

SALINIZZAZIONE E QUALITÀ DELLE ACQUE:  
IMPATTI E IPOTESI DI MITIGAZIONE

SALINIZZAZIONE E QUALITÀ DELLE ACQUE: IMPATTI E IPOTESI DI MITIGAZIONE

*A cura di Nicola Colonna, Massimo Iannetta, Antonio Palucci*

2006 ENEA  
Ente per le Nuove tecnologie,  
l'Energia e l'Ambiente

Lungotevere Thaon di Revel, 76  
00196 Roma

ISBN 88-8286-191-0



Ente per le Nuove tecnologie,  
l'Energia e l'Ambiente

# SALINIZZAZIONE E QUALITÀ DELLE ACQUE: IMPATTI E IPOTESI DI MITIGAZIONE

A cura di:

NICOLA COLONNA, MASSIMO IANNETTA, ANTONIO PALUCCI



## ELENCO DELLE MONOGRAFIE

RIADE “Ricerca Integrata per l’Applicazione di tecnologie e processi innovativi per la lotta alla DEsertificazione” ha proposto e realizzato un avanzamento non solo nelle conoscenze settoriali, ma nell’approccio integrato e multidisciplinare, indispensabile per una tematica così complessa come la desertificazione. Di seguito sono riportate le 12 monografie prodotte nel corso delle attività di progetto, che documentano il lavoro svolto ed i risultati conseguiti.

1. La desertificazione in Italia e il progetto RIADE
2. Caratterizzazione tipologica dei fenomeni di desertificazione nell’Italia meridionale ed insulare
3. Indicatori di desertificazione: approccio integrato e supporto alle decisioni
4. Tecnologie innovative per l’analisi di variabili climatiche
5. Nuove tecnologie per lo studio della vegetazione in relazione ai cambiamenti climatici
6. Ricerca di metodi innovativi per l’analisi e la valutazione dell’erosione dei suoli mediante analisi isotopiche
7. La sostanza organica e la desertificazione: aspetti sperimentali e modellistica
8. Salinizzazione e qualità delle acque: impatti e ipotesi di mitigazione
9. Studio sulla gestione sostenibile delle risorse idriche: dall’analisi conoscitiva alle strategie di salvaguardia e tutela
10. Lettura dinamica delle relazioni tra territorio, insediamenti umani ed utilizzo delle risorse naturali: sistematizzazione e riproposizione in chiave innovativa delle conoscenze e tecniche tradizionali
11. Modellistica ambientale e sistemi di supporto alle decisioni per la lotta alla desertificazione
12. Appunti da un viaggio di studio...ciò che abbiamo imparato e che non avremmo altrimenti appreso (dal Master F-RIADE)

<http://www.riade.net>

Ricerca Integrata per l’Applicazione di tecnologie e processi innovativi per la lotta alla DEsertificazione



## INDICE

<b>1.</b>	<b>I processi di salinizzazione</b>	<b>7</b>
	<i>N. Colonna, M. Iannetta</i>	
1.1	La salinizzazione in Italia	8
1.2	Le aree pilota	12
<b>2.</b>	<b>Analisi del clima in Sicilia</b>	<b>15</b>
	<i>C. Vaccaro, D. Rapti Caputo</i>	
2.1	Eventi meteorici estremi	16
2.2	Condizioni climatiche durante le attività di progetto	17
2.3	Inquadramento climatico della zona di Licata	19
<b>3.</b>	<b>Geologia del territorio in esame</b>	<b>23</b>
	<i>C. Vaccaro, D. Rapti Caputo</i>	
3.1	Formazione Gessoso-Solfifera	23
3.2	Complesso evaporitico inferiore	24
<b>4.</b>	<b>Studio geologico-geochimico e caratterizzazione idro-chimica del fiume Imera Meridionale</b>	<b>27</b>
	<i>C. Vaccaro, D. Rapti Caputo, F. Lupia, R. Selvaggi</i>	
4.1	Il Bacino del Fiume Imera Meridionale	27
4.2	Stato qualitativo del fiume Imera	30
	4.2.1 Campagna ottobre 2003	30
	4.2.2 Campagna giugno 2004	36
	4.2.3 Campagna novembre 2004	39
	4.2.4 Campagna maggio 2005	45
	4.2.5 Criteri per la selezione del torrente Vaccarizzo	46
4.3	Bacino idrografico del torrente Vaccarizzo	48
	4.3.1 Considerazioni sui contributi inquinanti del torrente Vaccarizzo	49
4.4	Probabili cause del degrado delle risorse idriche nel bacino di Caltanissetta	50
<b>5.</b>	<b>Caratterizzazione idrogeologica e geochimica della fascia costiera del territorio di Licata</b>	<b>51</b>
	<i>C. Vaccaro, D. Rapti Caputo</i>	
5.1	I lineamenti geologici della fascia costiera di Licata	51
5.2	Idrogeochimica	53
5.3	Elaborazione dei dati idrogeochimici dell'acquifero in falda libera	60
	5.3.1 Relazione fra acquiferi e litologia	62

5.4	Tendenza evolutiva della linea di costa	63
5.5	Discussione e potenziali azioni per contrastare i fenomeni	65
<b>6.</b>	<b>Monitoraggio “on-line” della qualità delle acque del fiume Imera</b>	<b>67</b>
	<i>P. Capocecera, A. Poletti, S. Murgia, R. Selvaggi</i>	
6.1	Elementi sull'idrometria del fiume Imera	67
6.2	Scelta del sito di indagine	70
6.3	La salinità del fiume Imera	72
	6.3.1 <i>Il monitoraggio in continuo</i>	76
6.4	Conclusioni	78
<b>7.</b>	<b>L'indagine degli acquiferi siciliani con la tecnica della spettrofluorimetria laser</b>	<b>83</b>
	<i>A. Palucci, L. Fiorani</i>	
7.1	Introduzione	83
7.2	La tecnica di spettrofluorimetria laser	83
7.3	Le campagne di misura	85
	7.3.1 <i>Il laboratorio ENVILAB</i>	86
	7.3.2 <i>CASPER (Compact and Advanced Laser Spectrometer Riade)</i>	87
7.4	Risultati del monitoraggio	89
<b>8.</b>	<b>Stima dell'evapotraspirazione effettiva per l'ottimizzazione della gestione di aree irrigue</b>	<b>95</b>
	<i>M. Minacapilli, M. Sciortino, G. Salvetti, S. Natali</i>	
8.1	Introduzione	95
8.2	Lo scintillometro	95
8.3	Descrizione dell'area di studio e delle indagini effettuate	96
8.4	Il modello SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land)	99
	8.4.1 <i>Evapotraspirazione giornaliera</i>	99
8.5	Risultati e discussione della validazione del modello SEBAL a scala di campo	100
8.6	Applicazione del modello sebal a dati telerilevati	102
8.7	Conclusioni	104
<b>9.</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>105</b>
<b>10.</b>	<b>Bibliografia</b>	<b>107</b>
	<b>Contributi e ringraziamenti</b>	<b>109</b>

## 1. I PROCESSI DI SALINIZZAZIONE

Nicola Colonna, Massimo Iannetta

La salinizzazione, ovvero il processo per cui in un determinato suolo tendono ad accumularsi eccessive quantità di sali che ne compromettono la produttività biologica, è un fenomeno che desta preoccupazione crescente. Il fenomeno non è solo italiano ma è in aumento in tutta Europa e si concentra in particolare lungo le aree costiere marine.

Chi conosce bene i comprensori agricoli costieri italiani sa quanta importanza ha la qualità delle acque irrigue nella scelta delle specie da coltivare e nel conseguimento dei livelli produttivi e qualitativi richiesti dal mercato e sa quanti sforzi vengono fatti per poter disporre di acque di qualità accettabile.

Nella Piana di Latina ad esempio una grande azienda serricola specializzata, ha dovuto decidere di costruire un nuovo laghetto artificiale per incrementare la propria capacità di stoccaggio di acqua piovana all'indomani della scoperta che, dal proprio pozzo in uso da anni, prelevava ormai acqua con un tenore in sali elevato.

La tipologia di produzione fortemente legata al mercato e stretta da tempi di natura quasi "industriale", ha imposto scelte immediate ed onerose per non rallentare i cicli produttivi. In altre aree la salinità delle acque ha condotto alla progressiva scomparsa di alcune coltivazioni, fortemente sensibili al tenore salino delle acque di irrigazione, finanche alla chiusura di attività serricole un tempo fiorenti.

Il termine salinizzazione, la cui definizione è naturalmente legata all'accumulo dei sali nei suoli, è normalmente utilizzato anche per indicare il progressivo aumento della concentrazione salina delle acque. Si tratta in realtà di due fenomeni legati ma diversi.

Ad esempio, ad un aumento del tenore salino delle acque di pozzo utilizzate per l'irrigazione, si avrà un aumento della concentrazione salina nei suoli irrigati ma tale aumento seguirà dinamiche temporali e velocità diverse in relazione alle caratteristiche composizionali, strutturali e tessiturali dei suoli e alle condizioni climatiche.

In determinati terreni, drenati e con particolari andamenti termopluviometrici, l'accumulo dei sali nei suoli sarà solo temporaneo e facilmente si instaurerà un equilibrio tra accumulo e lisciviazione che consentirà nel tempo e con le dovute accortezze di mantenere l'attività agricola. In situazioni opposte, suoli limoso-argillosi poco permeabili e condizioni climatiche con limitate piogge ed elevate temperature, che favoriscono una elevata evapotraspirazione, l'accumulo dei sali nei primi strati del suolo sarà rapido ma la loro rimozione difficoltosa e solo tempi lunghi ed interventi complessi che mettono in atto strategie di gestione dell'irrigazione specifiche e drenaggi appropriati potranno consentire il mantenimento di condizioni di produttività accettabili.

In altri casi, quando la salinità è soprattutto sodica, si può giungere alla destrutturazione del terreno e alla profonda alterazione delle sue caratteristiche fisico-chimiche (coesione, ritenzione idrica), solitamente aggravata da una scarsa dotazione di sostanza organica, condizione comune di molti terreni coltivati del nostro paese.

Nella realtà ci troviamo sempre di fronte a situazioni che devono essere affrontate e studiate caso per caso al fine di comprendere le dinamiche temporali e le variabilità spaziali. Pozzi o aree molto vicini nello spazio, possono infatti avere comportamenti estremamente diversi ed è necessario disporre di informazioni dettagliate sugli acquiferi interessati per poter comprendere cosa stia accadendo e quali siano i potenziali rischi nel tempo.

Parimenti specifiche devono essere le strategie da mettere in atto per prevenire o contrastare il fenomeno. Molte sono ormai le esperienze circa le migliori tecniche di intervento per la gestione delle pratiche agricole in aree soggette al fenomeno della salinizzazione, ma ogni tecnica e ogni pratica operativa deve essere calata nello specifico contesto territoriale e socioeconomico e questo può essere fatto solo quando si disponga di una conoscenza integrata del fenomeno stesso, delle sue cause e dei suoi effetti attuali e potenziali.

È con questo approccio che nel progetto RIADE si è affrontato il tema salinizzazione studiandolo in aree diverse del paese dove, cause, concause ed effetti diversi, studiati da gruppi di ricerca separati, ma in contatto tra loro, hanno permesso di dare un contributo di conoscenza scientifica e tecnologica, che sarà sicuramente utile per altri contesti dove gli stessi problemi stanno emergendo modificando profondamente soprattutto il settore agricolo.

In questa logica si inserisce la nascita di un'impresa di spin-off, con l'intento di mettere a frutto le conoscenze e le tecnologie, messe a punto in RIADE, per contribuire al monitoraggio, risanamento e gestione integrata delle risorse ambientali.

In questo rapporto si riportano le esperienze svolte in due aree siciliane, mentre per le esperienze svolte in Sardegna, nell'area della Nurra, si rimanda al volume 9, della medesima collana di monografie, a cura di Giorgio Ghiglieri, Giulio Barbieri, Antonio Vernier, per una completa ed esaustiva descrizione di quanto realizzato.

## **1.1 La salinizzazione in Italia**

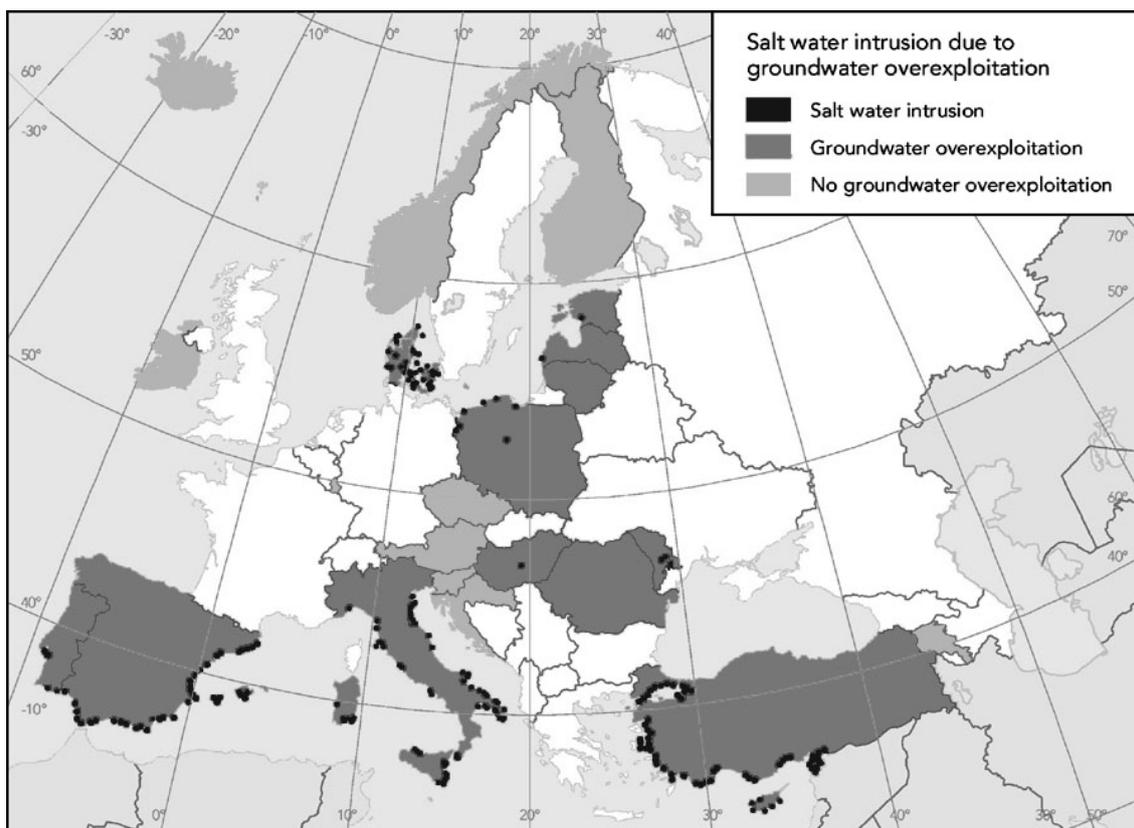
Il fenomeno della salinizzazione ha una genesi complessa e soprattutto diversa in aree differenti del mondo. Con lo stesso nome quindi indichiamo sia il dramma delle aree interne dell'Australia, dove il taglio delle aree boschive da destinare ad uso agricolo ha modificato gli equilibri che mantenevano il livello della falda a una distanza dalla superficie tale da impedire la risalita capillare, sia l'accumulo progressivo di sali in suoli irrigati in aree aride e semiaride, che l'intrusione salina che si verifica per eccessivo sfruttamento delle falde nelle aree costiere di molti paesi europei.

In Europa il fenomeno è diffuso e conosciuto soprattutto nei paesi che si affacciano sul mediterraneo (Figura 1.1) ed è strettamente legato all'eccessivo sfruttamento delle falde che provoca l'intrusione salina.

Per la Spagna, la Turchia e l'Italia esistono sufficienti informazioni per evidenziare il legame tra lo sfruttamento degli acquiferi e i fenomeni puntuali di intrusione delle acque marine. In altri paesi mediterranei, quali Grecia e Francia, il fenomeno è presente e conosciuto ma non sono disponibili informazioni organizzate tali da creare un quadro sufficientemente chiaro e affidabile. Dalla figura si evidenzia come il fenomeno non sia una peculiarità mediterranea ma interessi anche paesi con condizioni pedoclimatiche completamente differenti, dove le determinanti possono essere molto diverse. È evidente come paesi quali la Danimarca, privi di abbondanti risorse idriche, soffrano particolarmente del medesimo problema.

In Figura 1.2 è riportato il dettaglio della carta dell'Agenzia Europea dell'Ambiente relativamente all'Italia. Se sovrappolessimo questa carta con la carta delle aree pianeggianti costiere ad elevata intensivizzazione agricola troveremmo una ottima corrispondenza.

**Figura 1.1 - Estensione del fenomeno dell'intrusione salina in alcuni paesi europei**



Fonte: Agenzia Europea dell'Ambiente, 2003

Per quelle aree dove tale corrispondenza non è evidente dovremmo effettuare il confronto con le aree a forte vocazione turistica.

In pratica il fenomeno è distribuito lungo tutta la linea di costa italiana con alcune aree di forte concentrazione in Toscana, Sardegna, Sicilia, Puglia ed Emilia Romagna.

La letteratura più recente riporta anche altre aree che, in questa rappresentazione risalente al 2003, non sono indicate.

Fino a pochi decenni fa la salinizzazione interessava solo poche e circoscritte aree costiere o limitate aree interne.

Oggi, ciò che preoccupa, è che il numero e la superficie di aree interessate è fortemente aumentata nel giro di pochi anni.

L'unica stima disponibile indica, per l'Italia, circa 4500 km<sup>2</sup> di superficie territoriale affetta da salinizzazione, cioè l'1% del territorio nazionale (Fierotti et al., 1999) e si riferisce al totale dei suoli affetti cioè sia quelli di origine naturale che antropica.

Non sono disponibili informazioni precise sulla dinamica del processo.

È noto che la carta di Figura 1.2 non riporta diversi siti dove il problema è presente, ad esempio, Gioia Tauro, Sibari, Lamezia Terme.

Figura 1.2 - L'intrusione salina in Italia



Fonte: Agenzia Europea dell'Ambiente, 2003 (modificato)

La comprensione delle cause di questa espansione, spinge necessariamente la nostra attenzione, al di là del fenomeno fisico chimico, a considerare le determinanti cioè quelle attività economiche che sono in qualche modo le prime responsabili, indicate più comunemente con il termine inglese *driving forces*.

Nei recenti rapporti della Agenzia Europea dell'Ambiente, il fenomeno dell'intrusione delle acque marine è analizzato nelle sue relazioni di causa ed effetto.

L'agricoltura è sicuramente il settore economico che ha il ruolo più importante, sebbene non siano da trascurare i contributi dell'industria, del turismo e dei consumi domestici.

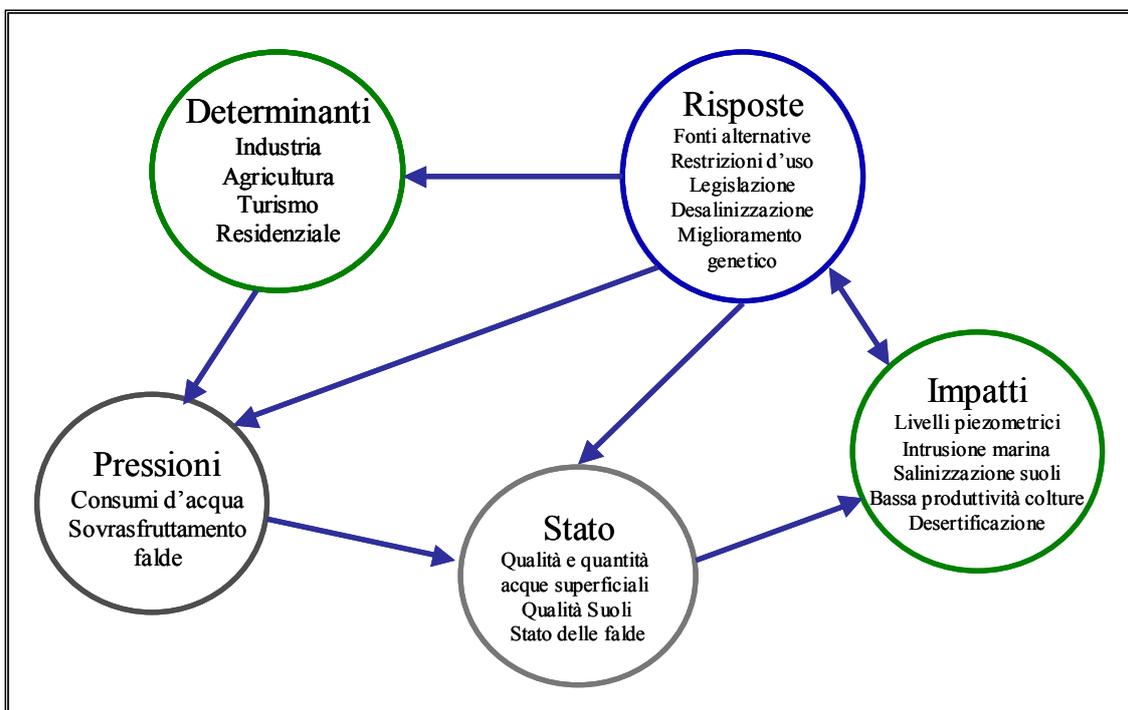
Generalizzando, potremmo dire che la "litoralizzazione", cioè la progressiva concentrazione della popolazione e delle attività economiche nelle aree litoranee del nostro paese, è un processo che ha evidenti connessioni con l'eccessivo sfruttamento delle acque superficiali e sottosuperficiali che è a sua volta legato all'aumento delle aree interessate dall'intrusione marina.

Per approfondire le relazioni tra lo stato delle nostre acque e dei suoli e le cause che lo determinano è utile rifarsi ad uno schema interpretativo adottato a livello europeo, il cosiddetto DPSIR (AEA, 2003). Questo mette in luce le relazioni di causa-effetto relative ad un fenomeno ambientale evidenziando quali siano le *Determinanti* che generano le *Pressioni* che contribuiscono a determinare lo *Stato* dell'ambiente, il quale genera e identifica gli *Impatti* sull'ambiente e sull'uomo. Le *Risposte* sono quell'insieme di azioni, tecnologie e/o atti normativi che consentono di prevenire, mitigare il fenomeno o adattarsi ai suoi *impatti*.

Tra le determinanti (Figura 1.3) i settori agricolo, turistico e industriale, e il settore dei consumi residenziali, giocano un ruolo importante. Questi, nel loro insieme generano pressioni sull'ambiente causando elevati e crescenti consumi di acqua che possono contribuire a favorire l'ingressione del cuneo salino cioè la progressiva intrusione delle acque salmastre.

Le *Risposte* al problema possono agire sia sulle *Determinanti* che sulle *Pressioni* gli *Impatti* e lo *Stato* dell'ambiente. Gli interventi possono consistere in azioni di natura tecnologica (nuove fonti di approvvigionamento, desalinizzazione) misure legislative o regolamentari (norme, controlli) ma anche azioni di ricerca e conoscenza (varietà tolleranti ad elevate concentrazioni saline, monitoraggi). Deve essere chiaro che non esiste "la" risposta ma un insieme di misure e o azioni che, messe in atto dai diversi "attori", nel loro insieme, possono consentire di limitare o controllare il problema.

**Figura 1.3 - Schema DPSIR per il fenomeno della salinizzazione degli acquiferi**



Il progetto RIADE ha indicato e sviluppato una serie di supporti/strumenti necessari alla definizione delle migliori strategie per la gestione integrata delle risorse; questi sono utili sia nella fase di acquisizione delle conoscenze, monitoraggio, (radar meteo, spettrofluorimetri, sonde multiparametriche) che di definizione delle possibili azioni (Sistemi di supporto alle decisioni).

Il presente rapporto è una sintesi delle attività svolte dai gruppi di ricerca coinvolti che hanno affrontato molti, ma non tutti, dei punti riportati nello schema DPSIR, ma sempre operando con un approccio multidisciplinare ed integrato.

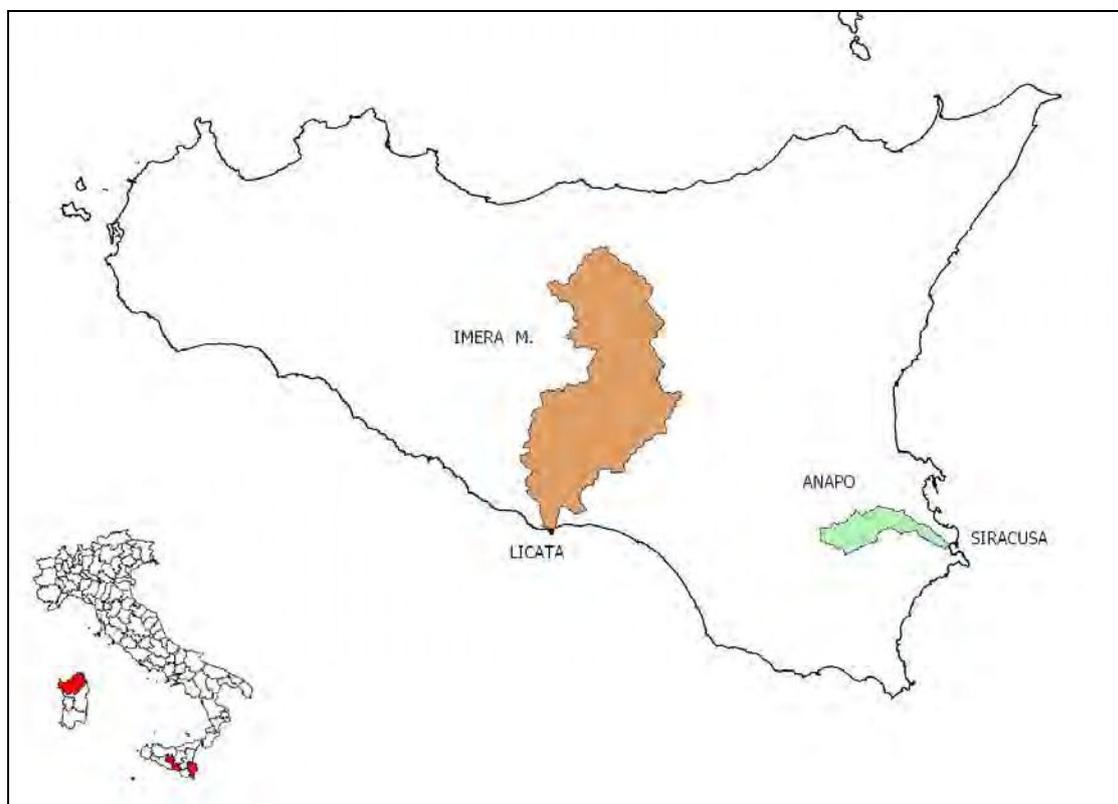
## 1.2 Le aree pilota

La scelta delle aree pilota è stata operata sulla base di molteplici considerazioni supportate da studi di contesto preliminari relativi alle condizioni socioeconomiche e alle caratteristiche del territorio.

Oltre all'area, già ricordata della Nurra, in Sardegna, sono state studiate le aree di Licata e di Siracusa, in Sicilia, nonché i relativi bacini di riferimento Imera Meridionale e Anapo illustrati nella figura 1.4.

La Tabella 1.1 sintetizza alcune delle principali caratteristiche dei bacini presi in considerazione nel progetto RIADE. La scelta è stata guidata dal fatto che pur con delle similarità abbiamo avuto la possibilità di analizzare tre contesti che si differenziano per ampiezza, livello di salinità riscontrato e per una diversa combinazione delle cause che contribuiscono a determinare il fenomeno.

Figura 1.4 - Aree di studio in Sicilia



**Tabella 1.1 - Principali caratteristiche delle aree studiate nel progetto RIADE**

Regione	Area	Determinanti	Cause antropiche	Cause naturali	Conducibilità ECw $\mu\text{S}/\text{cm}$
Sardegna	Nurra	Turismo Agricoltura	X	X	1000-3000
Sicilia	Licata	Agricoltura	X	XX	3000- 14000
Sicilia	Siracusa	Residenziale Industria Agricoltura	X		1000- 2500

Il fatto di scegliere aree dove, oltre al contributo importante delle attività umane, diverso da area ad area, si riscontra anche un contributo significativo delle caratteristiche litologiche, ha consentito di disporre di uno spettro ampio di situazioni e potersi così confrontare con tipologie differenti di salinità.

In ciascuna area sono state condotte attività di monitoraggio specifiche sulle acque e gli acquiferi, come pure sperimentazioni di nuove tecniche di indagine della qualità delle acque ed elaborazioni di cartografie tematiche specifiche.

Nella presente sintesi sono mostrate prevalentemente le attività svolte nell'area di Licata, all'interno del bacino dell'Imera Meridionale, mentre le altre attività saranno oggetto di pubblicazioni successive.

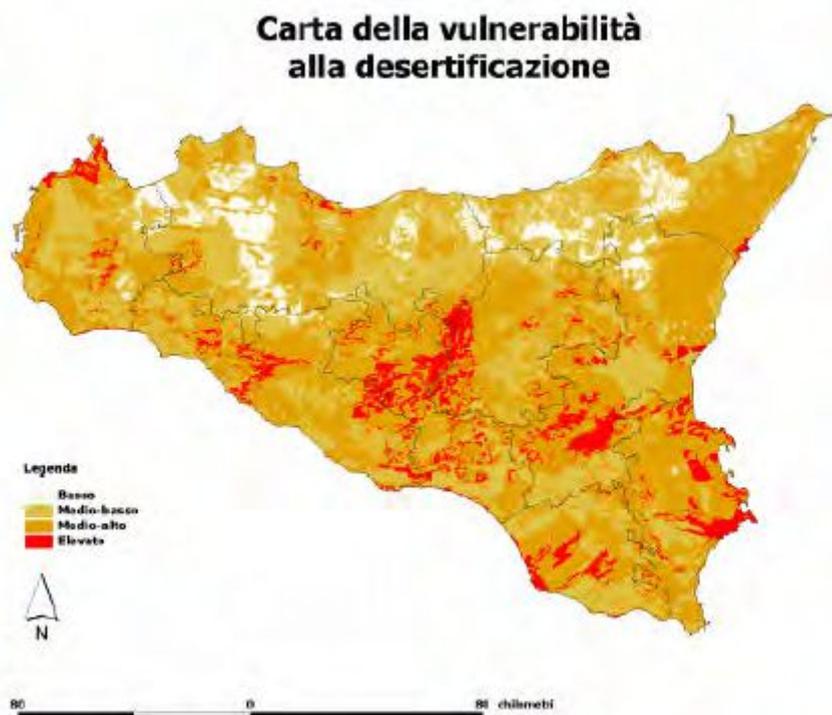
La rappresentatività delle aree selezionate è in accordo con l'analisi delle aree a maggior rischio di desertificazione individuate dalla Regione Sicilia (Carnemolla et al. 2004), riportate nella cartografia regionale di vulnerabilità alla desertificazione prodotta a scala 1:250.000, dal SIAS (Servizio Informativo Agrometeorologico Siciliano), applicando la metodologia SAR – Servizio Agrometeorologico Regionale per la Sardegna (Bandinelli et al., 2000) – che inserisce in un sistema GIS l'indice di desertificazione ottenuto attraverso la combinazione di tre differenti indici: indice di aridità; indice di siccità; indice di perdita di suolo (relativo alle caratteristiche del suolo, al suo uso e all'erosività nei confronti delle piogge).

Nella selezione delle aree studio, si è tenuto conto anche delle notevoli diversità di disponibilità, qualità e gestione delle risorse idriche del territorio siciliano che non permettono di individuare soluzioni estendibili a tutto il territorio.

Si è cercato inoltre di individuare le principali dinamiche locali che, sommate ai fattori naturali, permettono di delineare delle macroaree interprovinciali rappresentative ai fini del progetto. In particolare sono state selezionate due aree a rischio di desertificazione caratterizzate da notevoli diversità per:

- disponibilità e qualità delle risorse;
- meccanismi che inducono processi di degrado delle georisorse;
- geologia, biodiversità e morfologia.

Figura 1.5 - Carta della vulnerabilità alla desertificazione da Carnemolla et al. 2004



SIAS: Servizio Informativo Agrometeorologico Siciliano

La piana di Siracusa è stata selezionata per le problematiche di degrado dovute ad un uso competitivo delle georisorse e all'alterazione dei delicatissimi equilibri dovuti a perdita di funzionalità dei sistemi tradizionali di gestione delle risorse. Interessante è stato osservare lo stretto rapporto fra le problematiche di degrado e lo sviluppo dell'area industriale.

La descrizione del comportamento dinamico dell'acquifero della piana alluvionale dell'Anapo, fornisce un'ottima chiave di lettura degli effetti prodotti da una gestione non compatibile delle georisorse e permette di identificare gli indicatori e i parametri da monitorare, in aree prossime a siti industriali altamente idroesigenti.

Il territorio di Licata, è stato selezionato perché storicamente caratterizzato da problemi di desertificazione e da gravi crisi idriche, in cui l'uso per scopi irrigui di acque di bassa qualità e la diminuzione del trasporto solido stanno accelerando il degrado della fertile pianura alluvionale con gravi problemi socio-economici.

Inoltre, quest'area è estremamente sensibile ai cambiamenti climatici ed in essa si assiste a un incremento significativo della temperatura (cfr. cap. 2).

La Figura 1.5 evidenzia che il bacino dell'Imera e la piana di Licata sono aree ad elevato rischio di desertificazione.

## 2. ANALISI DEL CLIMA IN SICILIA

Carmela Vaccaro, Dimitra Rapti Caputo

L'analisi del clima è fondamentale per la ricostruzione del ciclo dell'acqua e dei fenomeni di degrado qualitativo e quantitativo delle georisorse (suolo e risorse idriche superficiali e sotterranee). Le aree selezionate per il progetto, sono rappresentative degli ambienti climatici della Sicilia, ed in particolare costituiscono fasce microclimatiche che si differenziano fra loro per forti differenze termiche.

Per approfondire i contributi del clima al degrado delle georisorse sono stati elaborati i dati relativi alle stazioni che insistono nelle aree di progetto resi disponibili dal Servizio Agrometeorologico Siciliano. Fortunatamente le stazioni di interesse ricoprono un periodo di osservazione molto esteso per cui l'analisi del clima di dettaglio, ha permesso di verificare i negativi effetti delle fluttuazioni climatiche sulle problematiche di desertificazione.

Si è quindi proceduto alla verifica dell'entità delle eventuali variazioni dei regimi termopluviometrici degli ultimi anni.

In Sicilia le precipitazioni, caratterizzate da distribuzioni fortemente irregolari a causa delle differenze orografiche, mostrano da un anno all'altro forti deviazioni dai valori medi. Il 70-80% circa delle piogge cadono fra ottobre e marzo, con massimi delle precipitazioni nel mese di novembre a causa dell'anticiclone tropicale marittimo (che spostandosi verso latitudini più basse espone le regioni mediterranee alle perturbazioni Atlantiche); mentre da aprile a settembre si realizzano condizioni di alte pressioni, legate alla espansione dell'anticiclone delle Azzorre (che deviando i percorsi dei cicloni delle medie latitudini verso il Nord Europa, favorisce la stagione siccitosa) producendo prolungate siccità con condizioni aride da giugno ad agosto.

L'area delle Madonie o settore montano dell'Imera Meridionale, essendo insieme al sistema montuoso dei Nebrodi e dei Peloritani, uno dei settori più piovosi della Sicilia, con precipitazioni medie annue intorno ai 1.300 mm, è stata esclusa dal progetto, ma viene esaminata meteorologicamente in quanto grazie al basso impatto antropico, e all'assenza di litologie della gessoso solfifera, fornisce notevoli volumi d'acqua, di ottima qualità alle aree collinari e costiere. Tali aree forniscono infatti ingenti risorse idriche a molte zone della Sicilia centrale alimentando numerosi acquedotti.

Sono state esaminati i dati meteorologici delle stazioni che ricadono nei territori in cui insiste il Bacino dell'Imera Meridionale, che come è noto, si sviluppa in ampi settori dei territori di Enna e Caltanissetta. Dall'analisi dei dati (fruibili nel sito <http://217.58.222.70/>) meteorologici si evince che il territorio è interessato da elevate escursioni termiche, in cui inverni molto freddi si intervallano con estati aride e molto calde (le temperature possono superare 42 °C).

Altrettanto interessante è l'analisi dei dati meteorologici nel bacino del Fiume Anapo, il quale sintetizza tutte le problematiche relative alla fisiografia del bacino idrografico nel quale nonostante la sua limitata estensione essendo caratterizzato da un forte dislivello, si hanno brusche transizioni dalle zone ad elevata piovosità dell'altopiano Ibleo all'area costiera a regime siccitoso, transizioni che riproducono a piccola scala le problematiche di risposta ai cambiamenti climatici osservate in bacini di più ampia dimensione.

La fascia costiera centro-meridionale pur essendo arida ha minori escursioni termiche rispetto alle aree interne.

Nell'area Iblea dalla fascia termomediterranea secca (sistema Rivas-Martines) di Siracusa, caratterizzata da cinque mesi di aridità annui, si passa all'ambiente climatico Mesomediterraneo sub-umido ed umido dell'alta valle dell'Anapo, dove 600 mm di pioggia annui precipitano in autunno e in inverno, e sono scarsi o assenti in estate.

## 2.1 Eventi meteorici estremi

Dallo studio climatico delle aree campione emerge che sono stati registrati numerosi eventi meteorici eccezionali responsabili di alluvioni disastrose, eventi che hanno interessato la Sicilia, generalmente, all'inizio della stagione autunnale. Fra questi eventi nelle aree in studio sono da segnalare:

- due tragiche piene del F. Salso (Imera M.) agli inizi del '900, la prima più disastrosa nel 1910, la seconda meno disastrosa nel 1915, che purtroppo non sono sufficientemente documentate;
- un'altra importante piena ha interessato il F. Salso nel 1931 in coincidenza con una serie di importanti piogge che interessarono tutta la Sicilia, i pochi dati riguardano la stazione di Capodarso;
- Il 1° Gennaio del 1973 alle ore 12, dopo 36 ore di piogge intense ininterrotte, il fiume Salso allagò la piana di Licata. Fortunatamente non si registrarono danni di rilievo ed in tale occasione il Servizio Idrografico registrò nella stazione di Ponte Drasi una portata di 2278 mc/s;
- nel 1976 danni ingenti furono prodotti, nell'abitato di Licata, dall'esonazione del fiume Salso, la cui entità è descritta da Stancanelli (1978-1979), L'entità dei danni indusse la progettazione di opere idrauliche di protezione, per l'abitato, in grado deviare la portata in eccesso in una condotta che avrebbe dovuto convogliare l'eccedenza a circa 5 km ad Ovest dell'abitato di Licata. Fu realizzata la strozzatura ma non la condotta di deviazione dell'eccedenza per cui il 25 gennaio 1985 si ebbe un evento di piena che allagò la piana di Licata ricoprendo una superficie di circa 300 ettari;
- l'eccezionale evento pluviometrico dell'ottobre del 1991 che investì numerosi Comuni delle province di Agrigento, Caltanissetta ed Enna provocando rilevanti danni all'agricoltura, alle vie di comunicazione ed agli stessi centri abitati. Particolarmente drammatico fu l'alluvione che il 12 novembre del 1991 interessò Licata, infatti l'opera idraulica realizzata dopo l'evento alluvionale del 1985 protesse l'abitato di Licata ma costituendo una strozzatura produsse il rigurgito dell'acqua favorendo lo straripamento del fiume sia a destra e sia a sinistra dello stesso (allagò la ferrovia Licata-Canicattì danneggiando 800 m di binario, allagò la strada statale 115 distruggendo circa un km di tracciato e incanalandosi nel canale che sfocia nel golfo di Mollarella distrusse 10 abitazioni e danneggiò l'arenile);
- dal 14 al 18 settembre 2003 le province di Siracusa e Catania sono state interessate da abbondanti e intense precipitazioni (425 mm in 7 ore) che hanno causato gravi danni all'agricoltura e alle opere civili. Nella stazione di Siracusa (località Monasteri, al confine con il comune di Floridia) "baricentrica" rispetto al fenomeno furono rilevati 642 mm di pioggia in cinque giorni, di cui 398 mm erano caduti nella sola giornata di mercoledì.

Alle intense precipitazioni si contrappongono stagioni particolarmente siccitose, ad esempio la siccità dell'estate 2002, protratta fino all'autunno, che ha interessato la Sicilia meridionale, con gravi conseguenze sulla già compromessa situazione idrica. Le aree più sensibili al prolungarsi della siccità sono soprattutto la fascia costiera, a clima sub-umido secco, della provincia di Agrigento, dove precipitazioni annue comprese fra 230 e 639 mm producono gravi problemi e perdite del patrimonio ecologico e contribuiscono ad aggravare il rischio di desertificazione.

Le condizioni climatiche costituiscono al tempo stesso un vantaggio ed una limitazione per lo sviluppo dell'area poiché le attività produttive agricole, da un lato, beneficiano di temperature medie mensili che oscillano fra i 12 °C del mese di gennaio ed i 26 °C del mese di agosto ma dall'altro soffrono di una cronica insufficienza di acqua per le coltivazioni intensive, che costituiscono la maggiore fonte di reddito di Licata.

Infine è particolarmente preoccupante per gli effetti erosivi sul suolo la tendenza all'aumento degli eventi meteorici eccezionali, che sta caratterizzando il clima siciliano, infatti il Servizio Tecnico Idrografico Regionale, ha registrato nei mesi di gennaio e febbraio del 2003, nelle stazioni di Catania, una piovosità del 129% più elevata, rispetto al 2002, andamento che sembra confermarsi per il 2004.

## **2.2 Condizioni climatiche durante le attività di progetto**

Data l'importanza che le condizioni climatiche svolgono nei processi di ricarica degli acquiferi e nei fenomeni erosivi viene fornita una breve considerazione sulle condizioni che hanno caratterizzato le attività di progetto. Durante le attività di progetto si è registrato un periodo climaticamente rappresentativo delle variazioni climatiche estreme tipiche della Sicilia, confermando la sensibilità delle aree campione verso eventi meteorici eccezionali, responsabili, in alcuni casi, di eventi alluvionali disastrosi, che hanno interessato la Sicilia generalmente all'inizio della stagione autunnale.

In particolare il primo anno di attività è stato uno degli anni in assoluto a minore piovosità, caratterizzato da una forte crisi idrica ed il quasi totale prosciugamento di alcuni invasi, fra cui il Comunelli, il cui bacino è stato selezionato per le attività di progetto. Nel secondo e terzo anno di attività si sono osservate precipitazioni elevate, con eventi di pioggia intensa concentrata in poche ore.

Il susseguirsi di periodi climatici disomogenei, con caratteristiche estreme, ha permesso di verificare le relazioni fra ricarica delle risorse idriche, dinamica fluviale e caratteristiche idrogeochimiche, e quindi di raccogliere informazioni essenziali alla comprensione dei processi di desertificazione oggetto di studio.

In particolare è stato possibile osservare come il maggior apporto d'acqua per incremento della piovosità media annua, anziché produrre una diluizione degli inquinanti, ha favorito l'incremento del degrado in quanto è aumentato l'apporto di acque salate da sorgenti del bacino della serie gessoso solfifera, l'ultima campagna ha infatti evidenziato un generale incremento dell'inquinamento naturale delle acque del Salso.

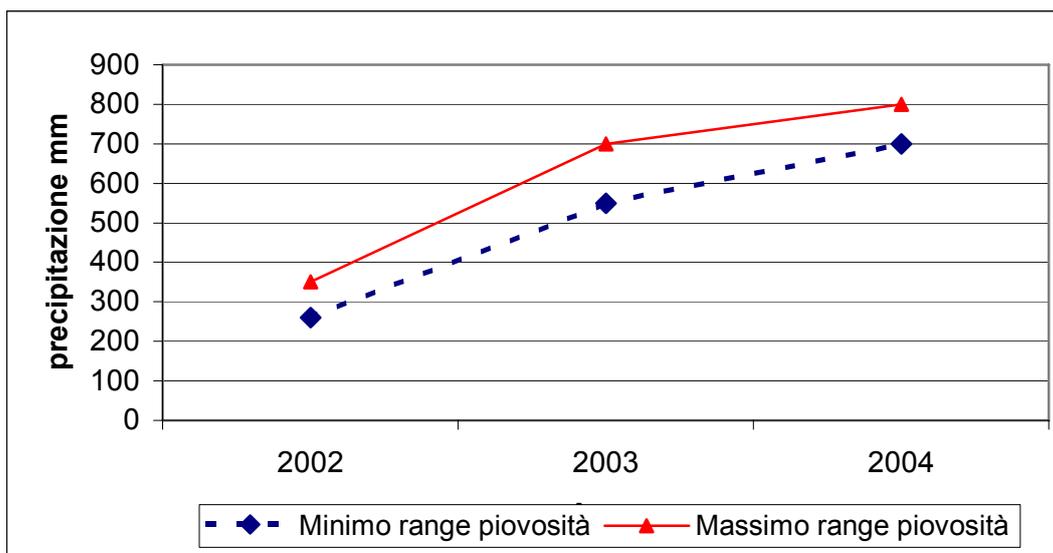
In particolare, confrontando i dati delle varie campagne emerge che gli apporti idrici legati a rapido deflusso delle acque superficiali, ha prodotto l'atteso effetto di diluizione solo nelle prime due campagne di misura effettuate durante un periodo siccitoso, pochi giorni dopo eventi di elevata piovosità.

Al contrario, nella campagna eseguita a maggio 2005, al termine di un periodo di elevata piovosità media annua, nonostante un incremento quantitativo degli apporti idrici nei corsi d'acqua, che ha prodotto una significativa ricarica degli acquiferi, si è osservata la stabilizzazione da apporti di sorgenti ad acqua salata. Capocecera (cfr cap. 5) elaborando i dati di una sonda installata nel Salso, in località Drasi, ha mostrato la non coincidenza dei picchi di altezza idrometrica con i valori massimi di conduttanza, dimostrando che il massimo di salinità non viene raggiunto nei momenti di magra ma bensì dopo un evento di piena e con un ritardo superiore alle ventiquattro ore rispetto ai massimi di portata.

Dal punto di vista climatico, analizzando i dati resi disponibili dal Servizio Informativo Agrometeorologico Siciliano (SIAS), emergono condizioni climatiche di estrema siccità nel 2002, testimoniate da una piovosità media annua di 350 mm, di cui circa 200 mm di piogge sono cadute nell'ultimo trimestre. Quindi, nel 2002, le zone interessate dallo studio sono state caratterizzate da una significativa diminuzione della quantità di pioggia caduta, il cui deficit di piogge, a livello annuale, è stato calcolato intorno a -30% nella provincia di Siracusa, -15% nella provincia di Caltanissetta e nel Comune di Licata (dati SIAS).

Al contrario durante il 2003 si è registrato un anno molto piovoso, per tutta la Sicilia, ed in particolare a Siracusa e nell'area iblea si è avuto un significativo incremento di piovosità con stazioni che hanno registrato fino a 1960 mm annui di pioggia, eventi climatici caratterizzati purtroppo da eventi estremi con episodi di straripamento del fiume Anapo. Anche se in maniera meno marcata del siracusano anche Caltanissetta (800 mm di pioggia annua) e Licata (700 mm di pioggia annua) sono stati interessati da un aumento importante della piovosità. Il 2004 è stato anch'esso un periodo significativamente piovoso, piovosità medie più contenute nella provincia di Siracusa in cui si sono registrate in alcune stazioni 800 mm di pioggia, e con piogge più consistenti a Caltanissetta (700 mm di pioggia annua) e Licata (800 mm di pioggia annua).

**Figura 2.1 - Range di precipitazione media annua nelle stazioni nel territorio di Gela**



Fonte: Servizio Informativo Agrometeorologico Siciliano (SIAS)

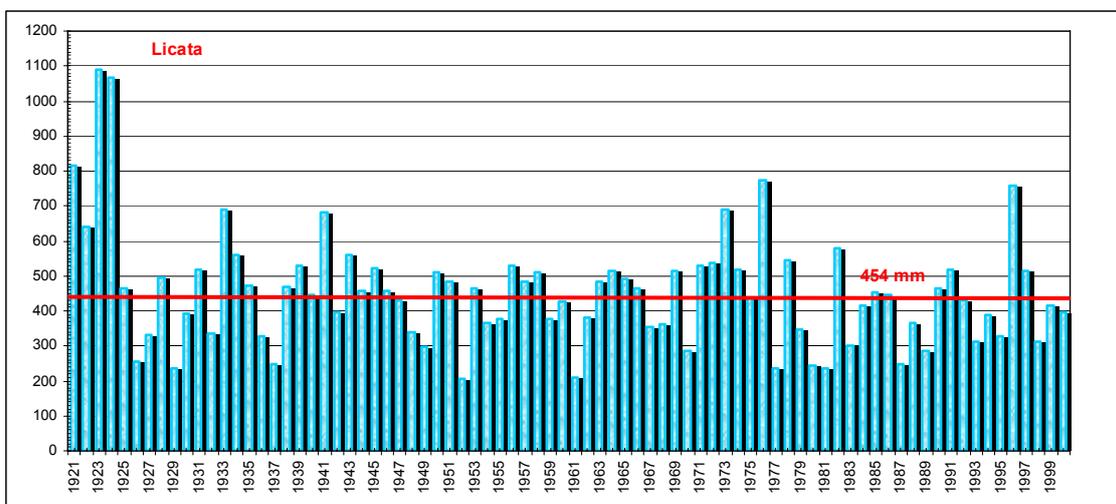
### 2.3 Inquadramento climatico della zona di Licata

L'elaborazione dei valori mensili delle precipitazioni e delle temperature della stazione climatica di Licata che si trova a quota di 142 m slm ha permesso di osservare le caratteristiche climatiche relative al periodo 1921-2000. Le precipitazioni annue per il periodo di osservazione sono di 454 mm con variazioni tra i 205,8 mm, nel 1952, ed i 1091, nel 1923.

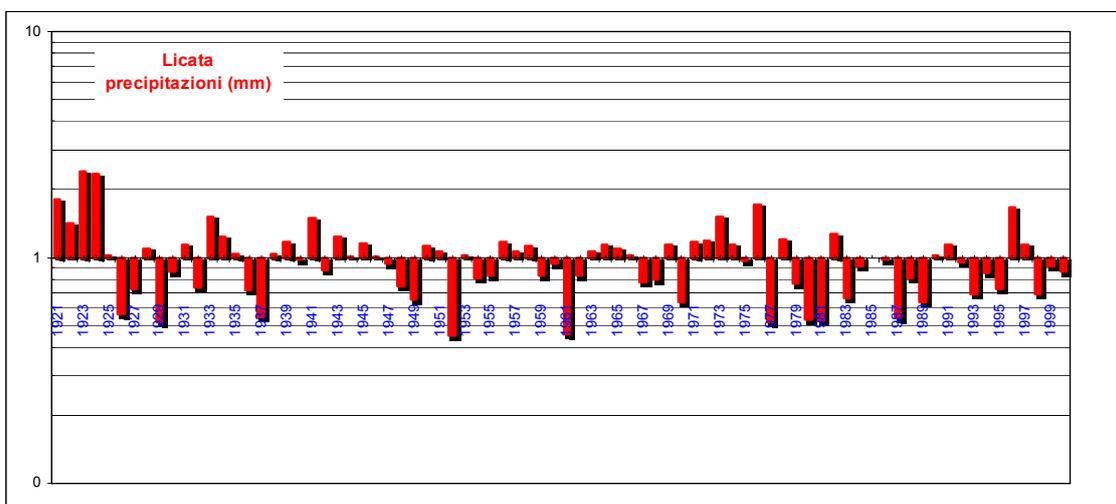
In particolare, dall'istogramma della distribuzione delle precipitazioni annue e quello della normalizzazione (Figure 2.2 e 2.3) si può osservare che:

- periodi di elevata piovosità alternati da periodi di bassa piovosità; maggiore frequenza presentano gli anni con piogge tra i 500 e 550 mm, mentre gli anni con pioggia maggiore di 550 mm rappresentano solo il 14% dell'ottantennio di osservazione (Figura 2.2);
- gli anni 1921-1925 corrispondono al periodo più piovoso in assoluto con precipitazioni medie che raggiungono i 904 mm;
- un prolungato periodo (24 anni) di bassa piovosità, con precipitazioni medie che non superano i 409 mm, dal 1977 al 2000, interrotto dall'anno piovoso del 1976 con 758,8 mm di pioggia.

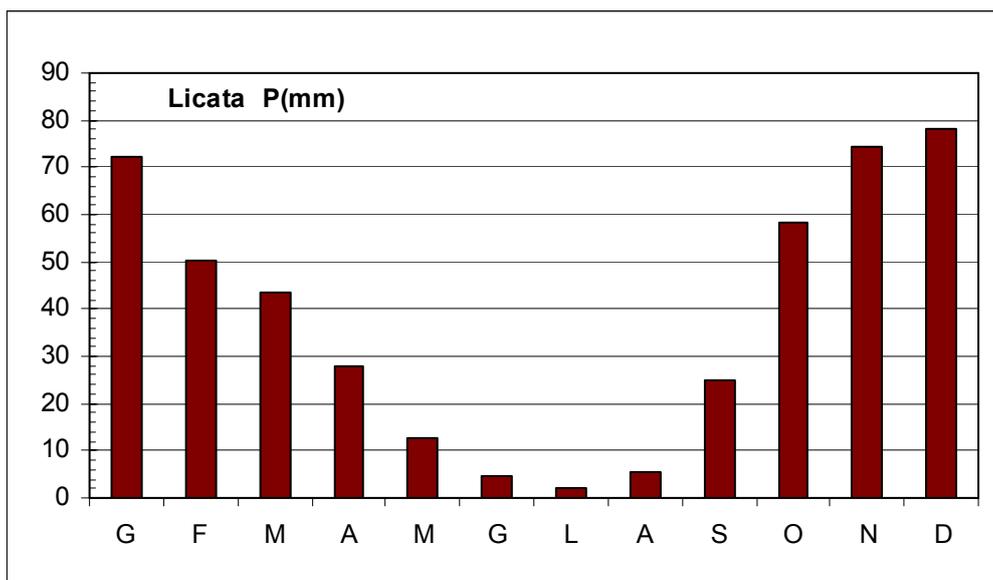
**Figura 2.2 - Istogramma della distribuzione delle precipitazioni annue nella stazione climatica di Licata (142 m slm)**



**Figura 2.3 - Diagramma di normalizzazione (precipitazione annua/precipitazione media relativa al periodo 1921-2000) delle precipitazioni annue nella stazione climatica di Licata (142 m slm)**

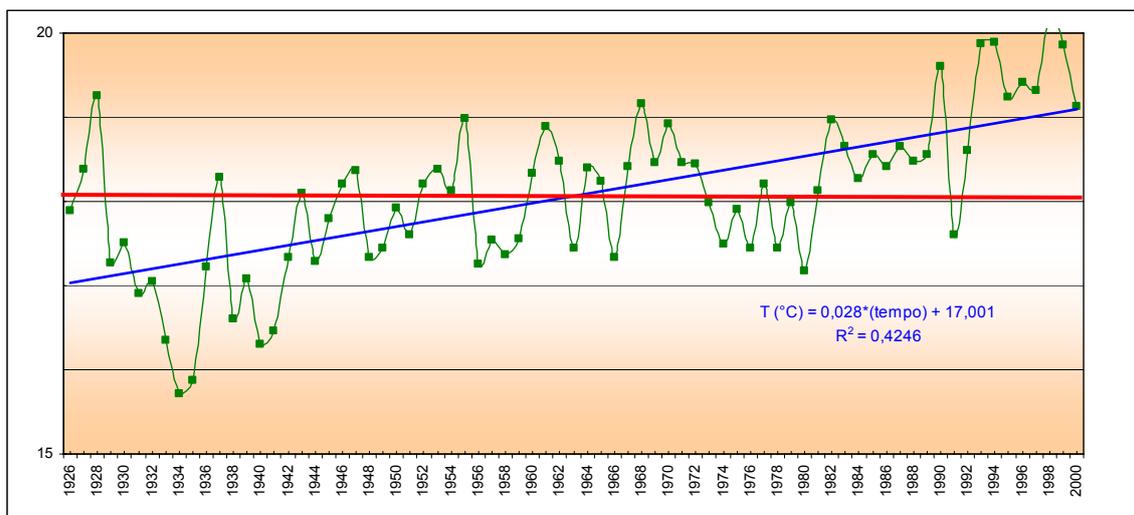


**Figura 2.4 - Precipitazioni medie mensili nella stazione di Licata per il periodo 1921-2000**



Dalla distribuzione delle precipitazioni medie mensili (Figura 2.4), relative al periodo 1921-2000, è evidente la graduale diminuzione delle precipitazioni da dicembre a luglio che risulta il mese più secco dell'anno, con appena 4,4 mm di pioggia. Dal mese di ottobre invece, fino a gennaio, osserviamo un brusco aumento delle precipitazioni che raggiungono in questo ultimo mese i 78,3 mm. Infatti, la scarsità delle piogge da maggio a settembre, in corrispondenza delle elevate temperature (Figura 2.6), favoriscono un'evapo-traspirazione 'quasi totale' delle acque con conseguente abbassamento del livello piezometrico degli acquiferi.

**Figura 2.5 - Variazioni delle temperature medie annue nella stazione di Licata per il periodo 1925-2000**



In questi periodi, quasi tutti i pozzi a falda libera, che sfruttano gli strati acquiferi più superficiali rimangono completamente secchi. A causa della mancanza di acqua le attività agricole vengono sospese.

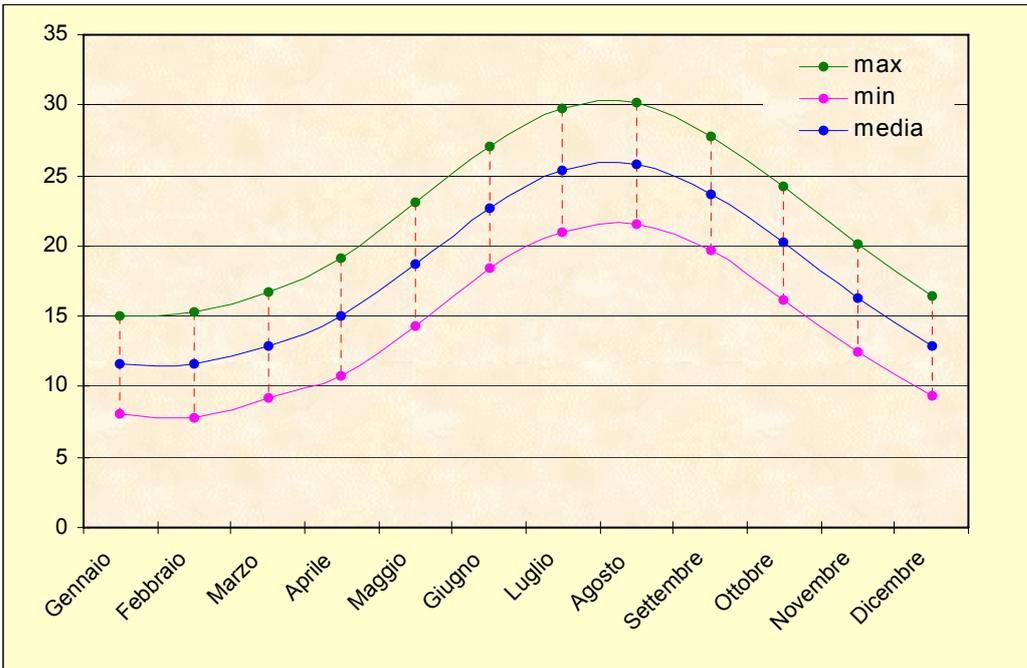
Dalla distribuzione delle temperature medie mensili riferite al periodo 1925-2000, nella stazione di Licata, possiamo osservare che (Figure 2.5, 2.6, 2.7):

- a) la temperatura media annua è di 18,1 °C con variazioni tra i 15,7 °C, nel 1934, ed i 19,9 °C, negli anni 1993, 1994 e 1999;
- b) un periodo freddo, dal 1926 al 1960, con una temperatura media di 18,03 °C ed un periodo più caldo, dal 1982 ad 2000, con temperatura media di 19,01 °C; gli anni intermedi, invece, sono stati caratterizzati da variazioni di temperature non significative;
- c) è evidente la presenza di un andamento positivo delle temperatura annue, che nel periodo 1993-2000 raggiungono i valori elevati di 19,6 °C;
- d) le temperature massime si osservano nei mesi estivi, mentre il mese più freddo dell'anno è gennaio con una temperatura media mensile pari a 11,55 °C.

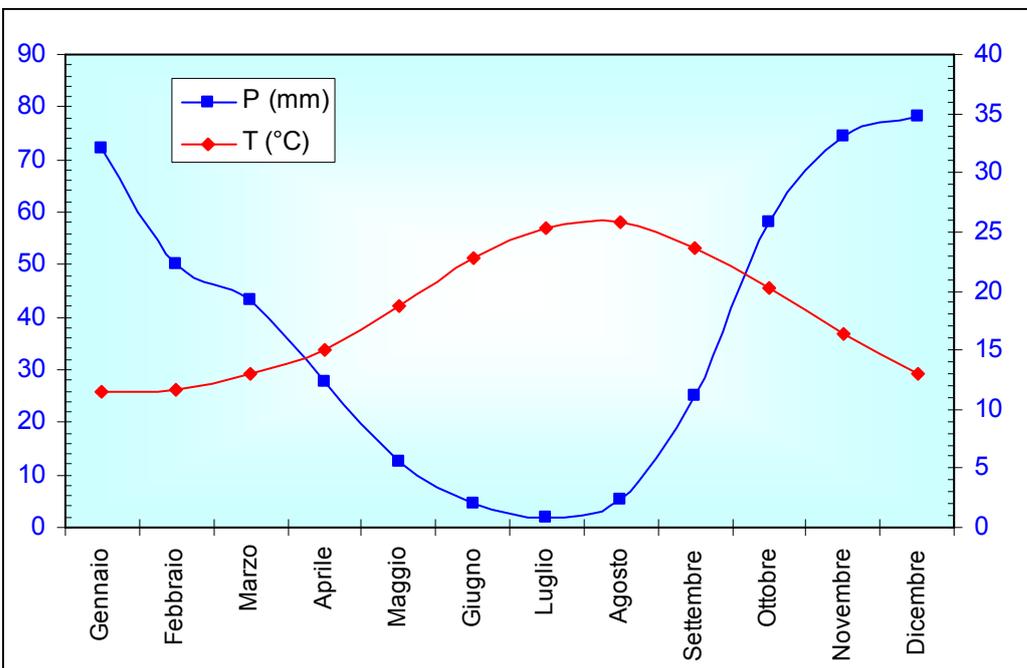
Dal diagramma delle variazioni delle temperature e delle precipitazioni medie mensili della Figura 2.7 è evidente che la ricarica degli acquiferi si effettua, in generale, dal mese di ottobre fino a marzo; mentre negli altri mesi dell'anno prevale il fenomeno dell'evapo-traspirazione e del ruscellamento superficiale.

Nella piana di Licata, a causa delle scarse pendenze, in corrispondenza delle formazioni affioranti caratterizzate da una media permeabilità, il ruscellamento può essere considerato minimo anche se non sono disponibili informazioni dirette.

**Figura 2.6 - Temperatura mensile (media; minima; massima) nella stazione di Licata**



**Figura 2.7 - Variazioni delle precipitazioni e delle temperature medie mensili per la stazione di Licata. Periodo di riferimento: 1926-2000**



### 3. GEOLOGIA DEL TERRITORIO IN ESAME

Carmela Vaccaro, Dimitra Rapti Caputo

L'area Centrale e Meridionale della Sicilia è caratterizzata da estesi affioramenti di rocce terrigene prevalentemente argillose e rocce evaporitiche legate alla crisi climatica del messiniano, che condizionano fortemente le caratteristiche qualitative e quantitative delle risorse idriche. Soprattutto la qualità delle acque superficiali e sotterranee dipendono dalla natura mineralogico-petrografica e dalla geometria delle formazioni geologiche presenti. Le sequenze litologiche interessate dalla presente indagine riguardano la successione sedimentaria dal Miocene all'attuale. Tali litologie sono interessate da un sistema di pieghe ed in prossimità della fossa tettonica Catania-Gela sono state coinvolte negli eventi collisionali tardorogeni (Pliocene medio) che hanno prodotto la falda Tardorogena plio-pleistocenica di Gela.

In seguito al sollevamento dell'area settentrionale della Sicilia durante la creazione della catena Appenninica Siciliana si hanno due fenomeni:

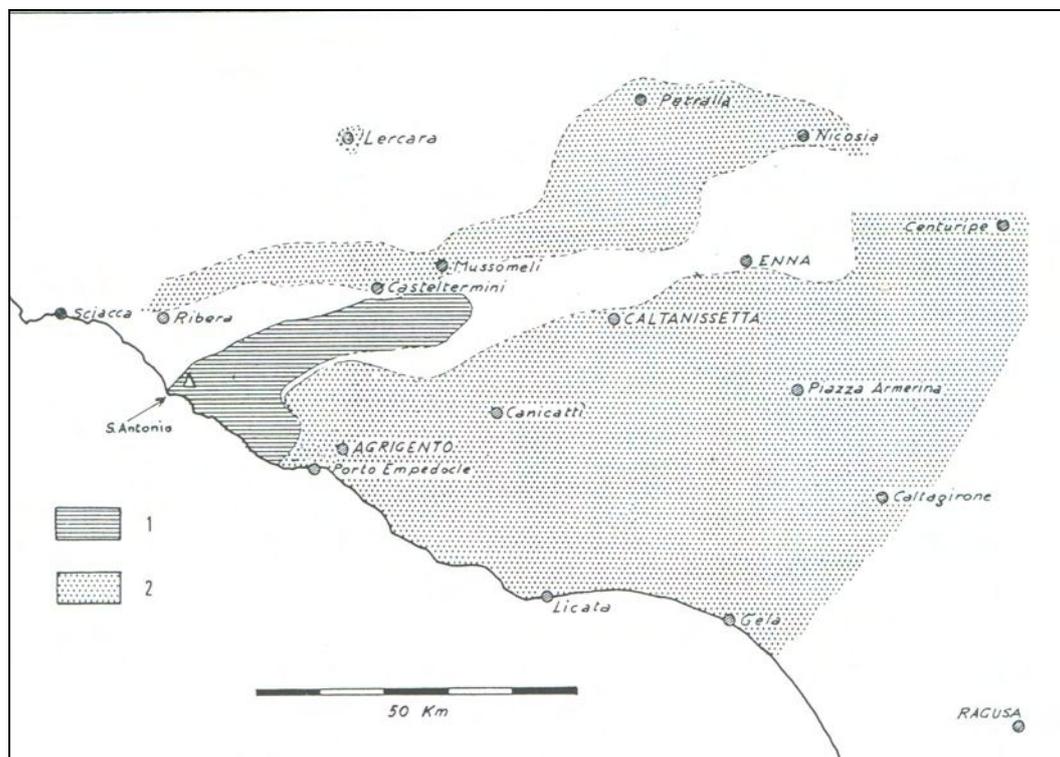
- a) il riempimento del bacino centro-meridionale dalle rocce prodotte dallo smantellamento delle aree emerse e deposizione dei sedimenti di natura argillosa, argilloso-sabbiosa, sabbiosa, conglomeratica e calcarenitica;
- b) la chiusura, nel Messiniano, del mare Mediterraneo presso l'attuale stretto di Gibilterra. Per l'elevata evaporazione e gli scarsi apporti fluviali, le acque intrappolate all'interno del bacino si arricchirono in sali con la deposizione dei terreni evaporitici, che dal basso verso l'alto sono caratterizzati da terreni che riflettono la solubilità dei sali e precisamente si passa dalla deposizione del carbonato di calcio noto come "*calcarea di base*" che costituisce la parte basale della successione evaporitica ai gessi e quindi al sale.

#### 3.1 Formazione Gessoso-Solfifera

La formazione gessoso solfifera è una successione prevalentemente evaporitica, depositata durante la crisi di salinità che ha interessato, nel Messiniano, tutto il bacino Mediterraneo. Alla base si riscontra la formazione di Tripoli (Mt), marne silicee derivate dall'accumulo di diatomee in un ambiente in cui si ha anche la deposizione di foraminiferi planctonici; questi depositi derivano dall'instaurarsi di condizioni anossiche che favoriscono lo sviluppo di alghe. Sul Tripoli si è depositato il calcare di base (Mc), deposito chimico di composizione carbonatica, quindi i gessi laminati e gessi selenitici (Mg). Solo in ristrette aree che rientrano nel bacino di Caltanissetta si ha la deposizione di salgemma e in rarissimi casi cloruri di potassio. Al limite inferiore di tale formazione, si trovano le marne e le argille del Tortoniano mentre il limite superiore è marcato dalla presenza di sedimentazione in ambiente pelagico con la deposizione dei Trubi.

All'interno della formazione sono state distinte delle sequenze appartenenti a differenti zone paleogeografiche. In particolare, Decima e Wezel (1971) hanno distinto due principali zone paleogeografiche che sono localizzate, la prima in una zona marginale, a sudest della linea Agrigento-Caltanissetta e a nordovest della linea Sciacca-Nicosia e, la seconda, nei pressi di Cattolica Eraclea (Figura 3.1).

**Figura 3.1- Facies del complesso evaporitico inferiore**  
**1) gessi di Cattolica Eraclea e 2) calcare di base (Decima e Wezel, 1971)**



In queste due zone si osservano variazioni laterali della fase evaporitica inferiore, mentre meno evidenti sono le variazioni nella fase superiore.

### 3.2 Complesso evaporitico inferiore

*La zona marginale* è costituita da due unità litostratigrafiche depositate in ambiente di acque basse:

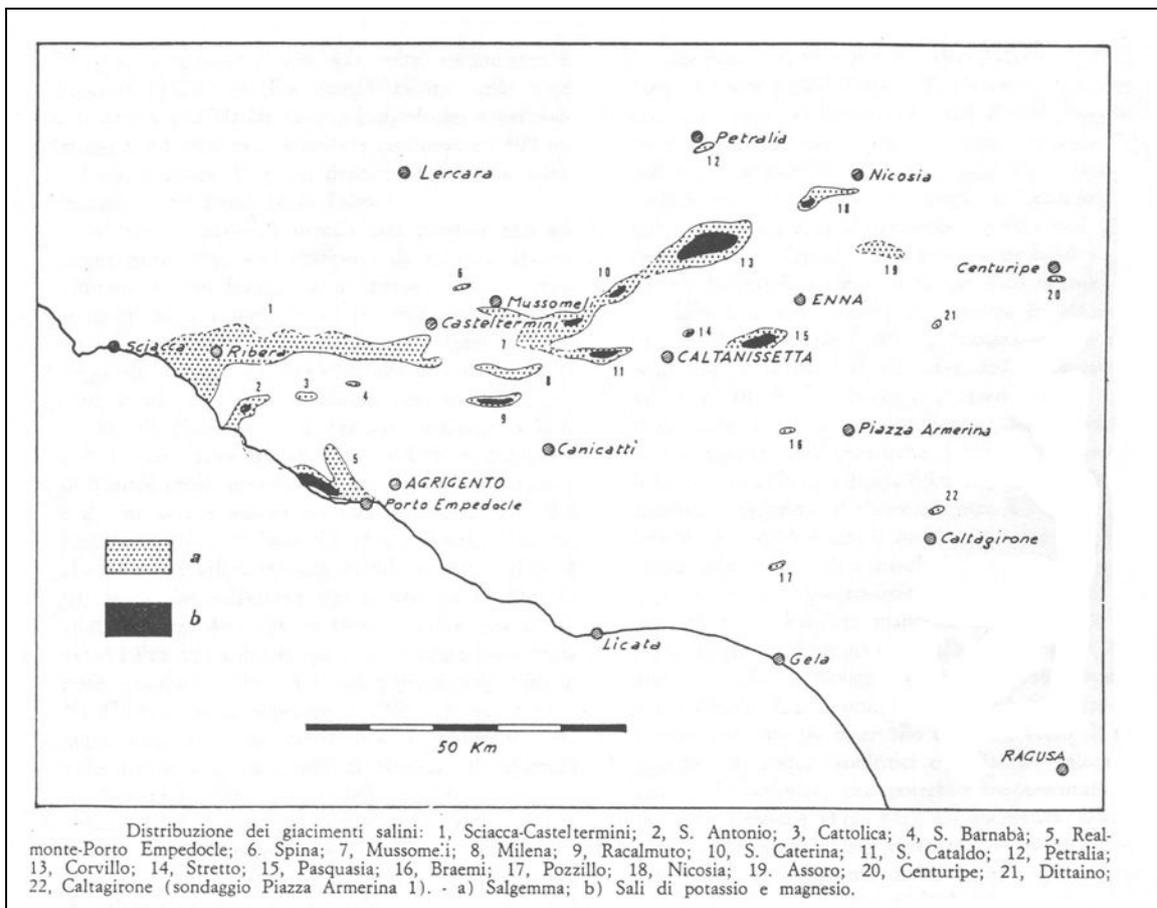
- la formazione di Tripoli con spessore variabile tra i 0 e 60 metri. In tale formazione possiamo distinguere alternanze di diatomiti candide, ricche in resti di pesci, con marne e calcari leggermente dolomitizzati. Nella parte più profonda, questa formazione acquista un colore scuro dovuto all'impregnazione di idrocarburi;
- la formazione del Calcare di base costituita da alternanze di strati marnosi, carbonatici e brecce farinose, con spessori che raggiungono i 80 metri.

*La zona di Cattolica Eraclea* è costituita da quattro unità litostratigrafiche:

- la formazione di Tripoli, con spessore variabile tra 0 e 20 m. In questa unità abbiamo depositi più terrosi con faune bentonitiche e planctonitiche più frequenti rispetto alla zona marginale;

- la formazione dei gessi di Cattolica Eraclea, con gessi selinitici massicci di spessore intorno ai 250-300 m, tali gessi si presentano in banchi massicci costituiti da grossi cristalli di selenite geminata, che possono raggiungere lo spessore di 20 metri;
- torbiditi gessose con spessore minore di 200 metri; si tratta di banchi torbiditici costituiti da sabbie gessose formati da elementi selinitici, mentre sono presenti intraclasti di marne a pirite; verso la parte alta della serie sono presenti in abbondanza marne verdastre piritose ricche di foraminiferi;
- salgemma e sali potassico-magnesiaci con spessore medio di circa 450 m che, localmente, come nel Porto di Empedolce, può superare gli 800 m; tale successione è stata studiata in numerosi sondaggi e nelle miniere in attività; i giacimenti salini costituiscono corpi indipendenti allineati in una fascia tra Sciacca e Nicosia, mentre manifestazioni locali più piccole di tali giacimenti sono state trovate in diverse località come si può osservare in Figura 3.2.

**Figura 3.2 - Distribuzione spaziale dei giacimenti salini (Decima e Wezel, 1971)**





#### **4. STUDIO GEOLOGICO-GEOCHIMICO E CARATTERIZZAZIONE IDRO-CHIMICA DEL FIUME Imera MERIDIONALE**

Carmela Vaccaro, Dimitra Rapti Caputo, Flavio Lupia, Roberta Selvaggi

L'attività svolta a Licata ha riguardato un'analisi di dettaglio delle problematiche geochimiche della fascia costiera e l'analisi delle caratteristiche idrochimiche delle aste principali del bacino dell'Imera Meridionale.

I parametri chimici delle acque ottenuti in collaborazione con il Dipartimento di Chimica dell'Università di Perugia, hanno permesso di confermare le segnalazioni di Roda del 1971, che indicava come fondamentale, nei processi di degrado delle risorse idriche dell'Imera Meridionale, i contributi di acqua salata, ricca in solfati e/o cloruri, da alcuni affluenti caratterizzati da rocce della serie gessoso solfifera.

Per la scarsa densità di attività antropiche, la composizione geochimica delle acque del Fiume Salso è dovuta ai processi geochimici di solubilizzazione delle rocce della serie gessoso solfifera, per cui le risorse idriche più compromesse sono localizzate nelle aree in cui maggiore è la presenza di depositi evaporitici e dove le giaciture e la morfologia favoriscono interazioni fra i fluidi (acqua piovana) e la matrice solida (roccia).

Il monitoraggio delle caratteristiche geochimiche delle risorse idriche del bacino idrografico del fiume Imera M. o Salso è stato eseguito in punti strategici selezionati attraverso l'integrazione dell'analisi dell'idrografia e della distribuzione delle litologie della serie gessoso solfifera, rocce che si ricorda sono estremamente solubili e storicamente responsabili dei gravi problemi di salinità nelle acque nella Sicilia centro-meridionale.

Per la caratterizzazione della qualità delle acque fluviali, alla scala del bacino idrografico, sono state eseguite quattro campagne di misure dei parametri idrochimici accompagnate dal prelievo di campioni.

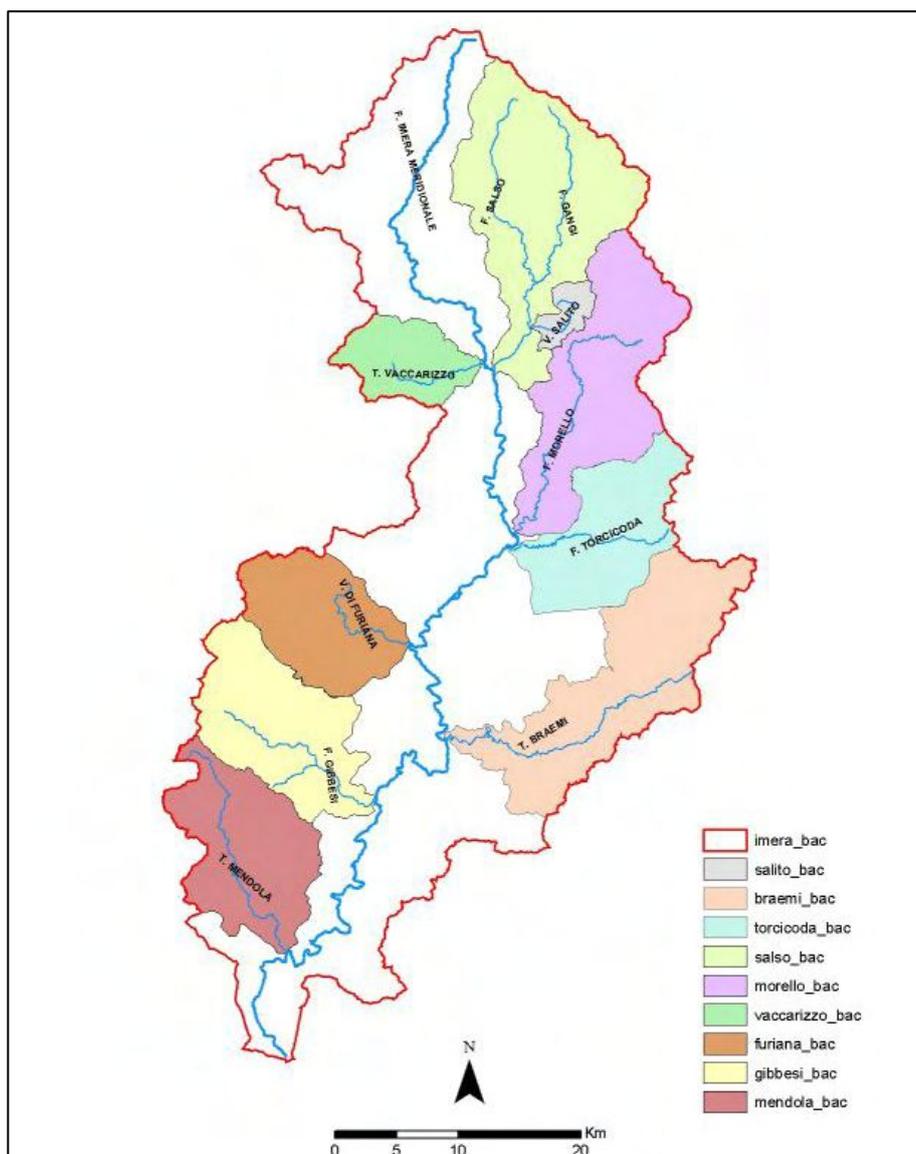
Per le quattro campagne di misura viene fornita una dettagliata descrizione delle aree campionate e dei risultati ottenuti.

##### **4.1 Il Bacino del fiume Imera Meridionale**

Il bacino idrografico del fiume Imera ha un'estensione di circa 2000 km<sup>2</sup> ed attraversa i territori provinciali di Palermo, Caltanissetta, Enna ed Agrigento (Figura 4.1). Esso sfocia presso la città di Licata nel Canale di Sicilia dopo un percorso di circa 132 km (lunghezza dell'asta principale). Si tratta del secondo fiume per grandezza del bacino idrografico della Sicilia, dopo quello del Simeto.

La quota media del bacino è di circa 495 m slm, con la cima più alta (1912 m) in corrispondenza del Monte San Salvatore a NO di Petralia Sottana. I principali affluenti sono i fiumi Salso, Morello, Gibbesi e Torcicoda ed i torrenti Braemi e Alberi, mentre il regime fluviale è principalmente di carattere torrentizio con periodi di basso, quasi nullo, regime idrografico alternati a periodi con elevati deflussi.

**Figura 4.1 - Bacino del fiume Imera, suddivisione in sottobacini con relative denominazioni**



Le colture prevalenti del bacino sono i seminativi (71%), mentre circa il 20% della superficie è occupata da colture arboree.

Dal punto di vista geomorfologico, il bacino è caratterizzato dalla presenza della catena montuosa delle Madonie, nel settore settentrionale, e da una morfologia collinare, nella parte centrale, dove affiorano estesamente le litologie della successione evaporitica, comprese tra i termini terrigeni tortoniani e pliocenici. Nel settore meridionale, invece, prevale l'assetto pianeggiante. La presenza degli affioramenti della successione evaporitica ha come conseguenza l'arricchimento in sali delle acque di ruscellamento superficiale. Ciò compromette notevolmente le caratteristiche qualitative delle acque che risultano, pertanto, poco adatte anche per uso irriguo.

Negli ultimi decenni lungo alcuni settori dell'asta principale sono stati creati degli invasi che hanno prodotto diverse conseguenze:

- a) l'aumento del tempo di contatto tra la matrice solida (roccia) e l'acqua e, di conseguenza, l'aumento della salinità;
- b) la diminuzione del trasporto solido fluviale; anche se tale diminuzione è in generale dell'ordine del 5%, il mancato apporto di sedimenti al mare ha causato un'accelerazione dei fenomeni di erosione lungo la fascia costiera.

I principali invasi sono quelli di:

Villarosa in sinistra idrografica dell'Imera Meridionale lungo il fiume Morello. L'invaso, in funzione dal 1972, è stato realizzato per scopi industriali al servizio degli impianti di lavorazione dei sali potassici di Pasquasia della Italkali, copre un'area di circa 102 km<sup>2</sup> ed ha la capacità di ospitare complessivamente circa 1600 Mm<sup>3</sup> di acqua. La diga di sbarramento è costruita in terra zonata con nucleo impermeabile centrale costituito da materiale limoso-argilloso;

Gibbesi: alla fine degli anni '80 (1986) lungo il fiume Gibbesi è stato creato un bacino artificiale, mai invasato, di circa 116 km<sup>2</sup> che potrebbe ospitare circa 13,1 Mm<sup>3</sup> di acqua, destinata per uso potabile, industriale, idroelettrico ed irriguo;

Olivo: si tratta di un bacino artificiale di 60 km<sup>2</sup> con una capacità totale di 14,1 Mm<sup>3</sup> realizzato per lo sbarramento del Torrente Braemi alla fine degli anni '80 (1987). L'acqua raccolta viene destinata per scopi potabili, industriali, irrigui ed idroelettrici.

## 4.2 Stato qualitativo del fiume Imera

Per la limitata presenza di attività antropiche, la composizione delle acque del Fiume Salso è principalmente dovuta a tutti i processi geochimici che avvengono al contatto dei fluidi (acqua piovana) con la matrice solida (roccia) originaria.

Per una caratterizzazione generale della qualità delle acque fluviali del Fiume Salso, alla scala del bacino idrografico, sono state eseguite quattro campagne di misura dei parametri idrochimici accompagnate dal prelievo di campioni; per ciascuna di esse viene fornita una dettagliata descrizione delle aree campionate e dei risultati ottenuti.

### 4.2.1 Campagna ottobre 2003

La prima campagna d'indagine, eseguita il 24 e il 25 ottobre 2003, è stata mirata ad individuare le problematiche di salinizzazione del fiume Imera Meridionale, ed è consistita nell'esplorazione delle principali aste fluviali mediante caratterizzazione chimico-fisica delle acque superficiali e nel prelievo di 8 campioni da sottoporre ad analisi chimiche. Le stazioni di misura, individuate attraverso una analisi preliminare delle caratteristiche geologiche del bacino e l'elaborazione delle informazioni dedotte dalla letteratura, sono indicate in Figura 4.2.

Nei campioni raccolti sono stati misurati *in situ*, la conducibilità elettrica delle acque, il pH e la temperatura. In seguito presso il laboratorio chimico, sono state analizzate le concentrazioni ioniche principali (Ca, Mg, K, Na, Cl, SO<sub>4</sub> e NO<sub>3</sub>).

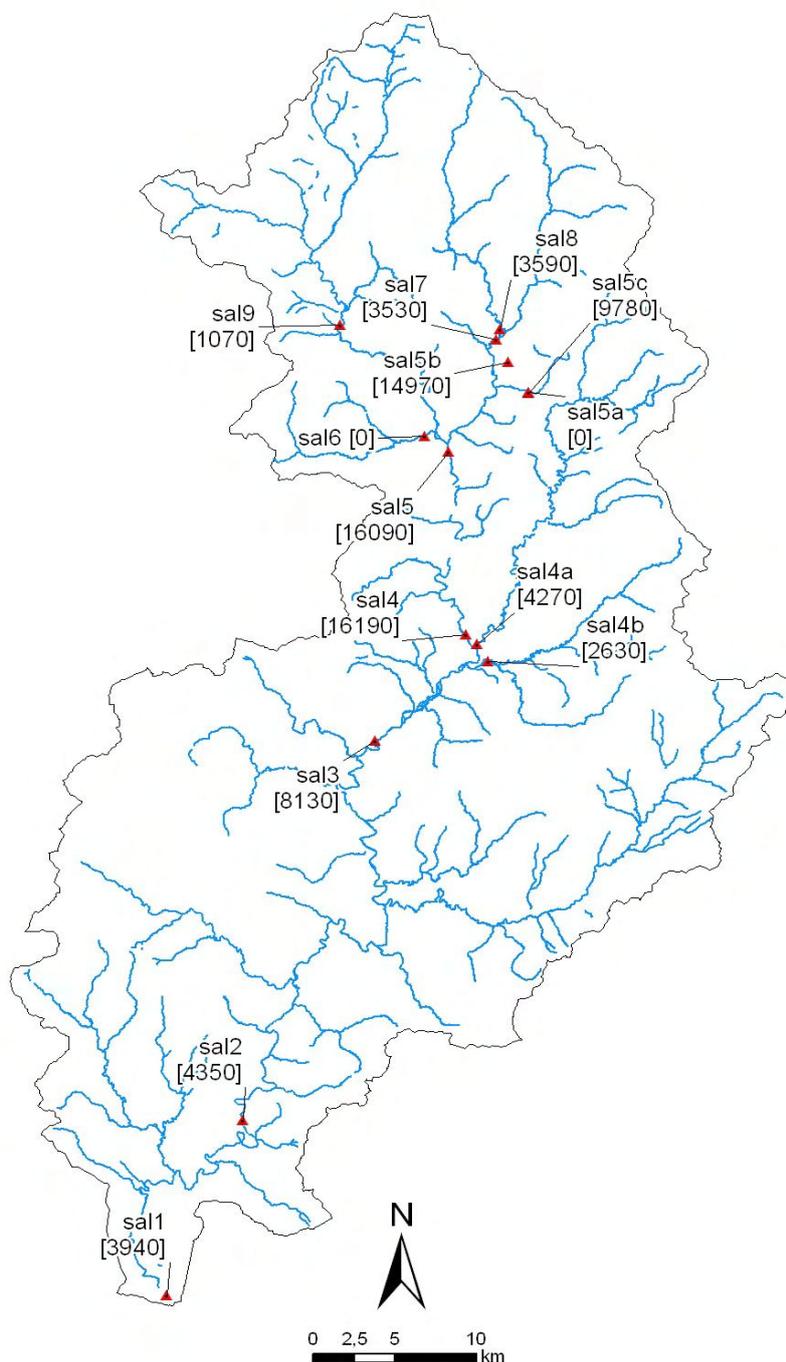
Dal punto di vista geochimico possiamo distinguere aste fluviali ad elevata salinità che raggiungono i 35,0 mS/cm, e a bassa salinità con valori pari a 1,0 mS/cm. Esempi di alta salinità si trovano lungo la destra idrografica del Salso, nelle zone dove affiora la Formazione Solfifera come lungo il ramo di Vaccarizzo (campione Sal 6). Un esempio a bassa salinità, invece, è il fiume Imera meridionale (Sal 9).

L'analisi di dettaglio evidenzia che i valori più elevati di conducibilità sono stati osservati per i campioni prelevati in località Vaccarizzo (Sal 6), Capodarso Ponte (Sal 4) e Ponte Cinque Archi (Sal 5) (35,00, 15,85, 15,68 mS/cm rispettivamente) per i quali sono state osservate anche le concentrazioni più alte in cloruri, solfati, nitrati, sodio, calcio, magnesio e potassio. Per i restanti campioni i valori di conducibilità si attestano tra 8 e 4 mS/cm, con un minimo di 1,09 mS/cm per il campionamento eseguito in località Ponte su Imera (Sal 9).

L'andamento dei valori di conducibilità e delle concentrazioni degli anioni e cationi indicano un aumento della salinità a valle del Ponte sul Salso (campioni Sal 7 e Sal 8) e del Ponte su Imera (Sal 9) dovuto all'immissione del Torrente Vaccarizzo (Sal 6). Nel tratto del fiume Salso compreso tra Ponte Cinque Archi (Sal 5) e Capodarso Ponte (Sal 4) il valore della conducibilità si attesta intorno ai 15 mS/cm per poi diminuire nel tratto Capodarso Ponte (Sal 4) - Besaro Ponte (Sal 3) - Drasi (Sal 2).

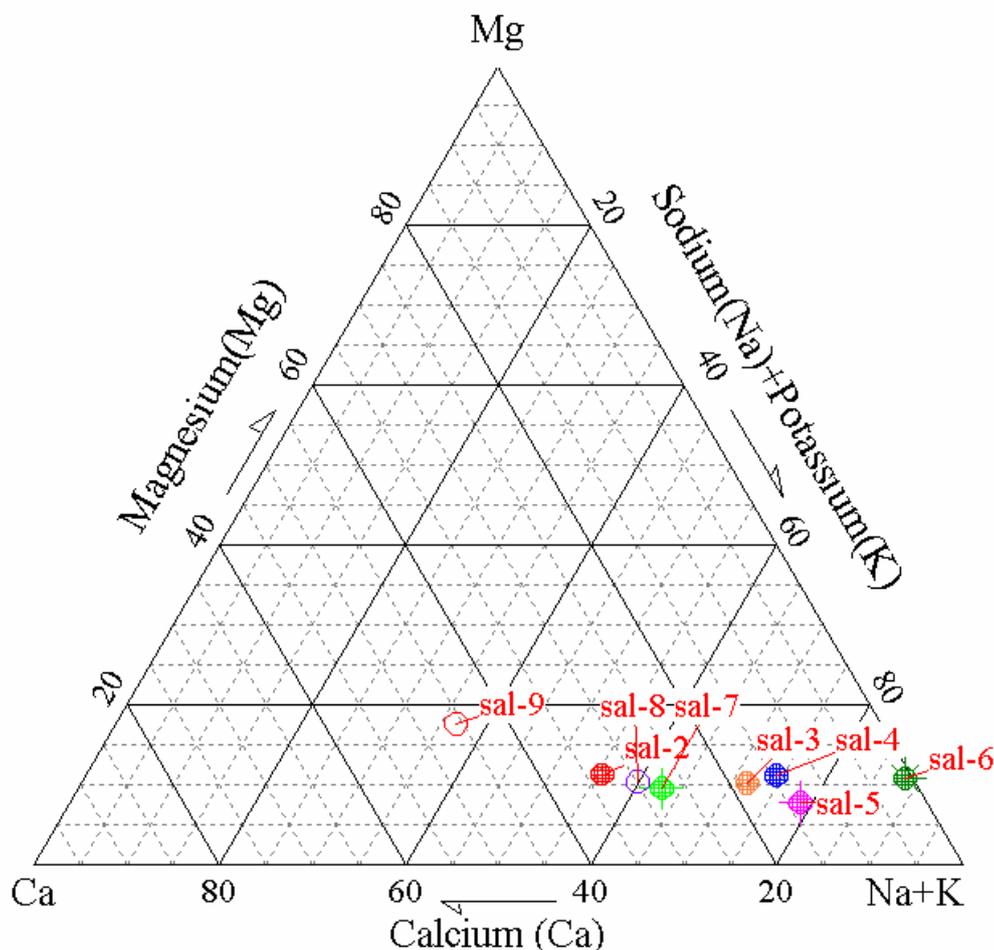
La diminuzione della salinità che si osserva in questo ultimo tratto è da attribuire all'effetto di diluizione dovuto all'immissione nel fiume Salso di torrenti ed affluenti caratterizzati da una minore salinità.

**Figura 4.2 - Campagna ottobre 2003. Ubicazione dei punti di campionamento sulla rete idrografica del fiume Imera**



**Nota: i valori di conducibilità sono espressi in microS/cm, i valori "0" indicano fuori scala dello strumento**

**Figura 4.3 - Rappresentazione delle concentrazioni ioniche (cationi) nel diagramma triangolare**



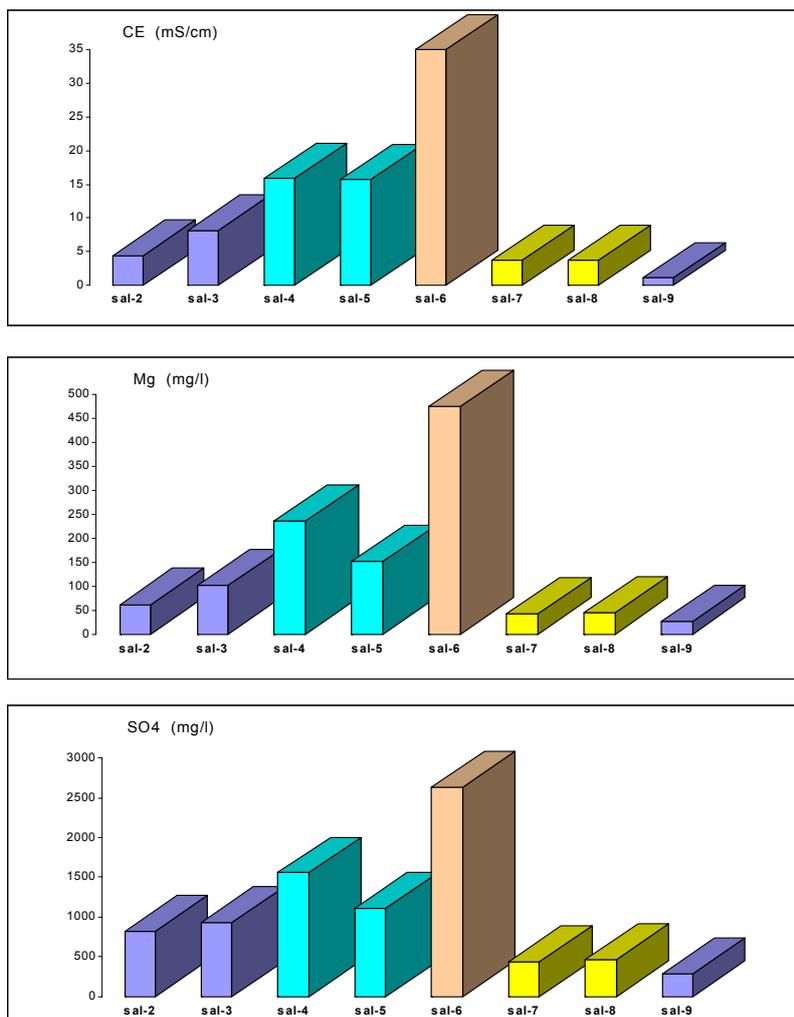
L'elaborazione dei risultati delle analisi chimiche ha messo in evidenza che:

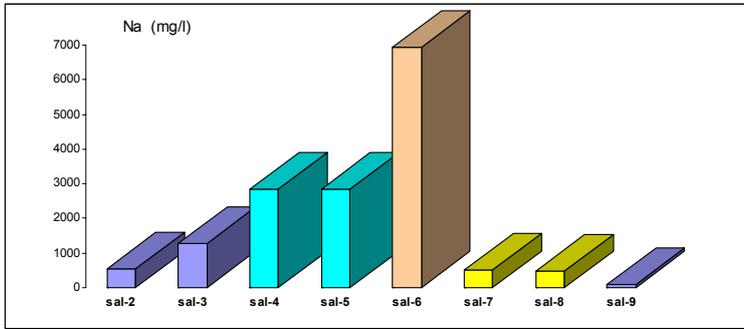
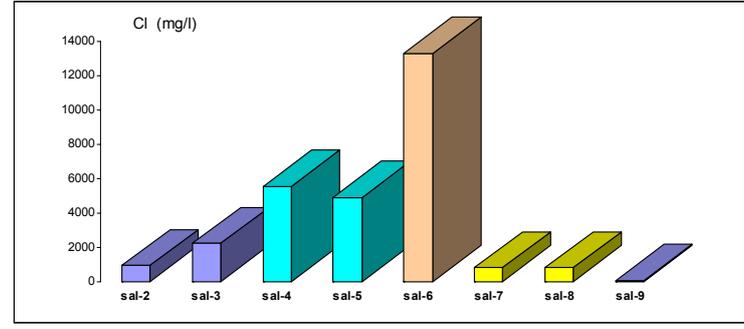
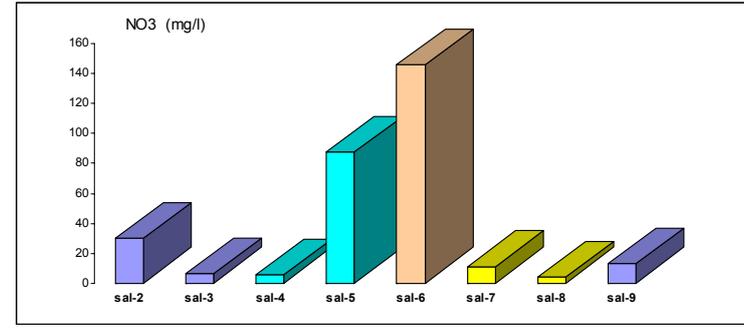
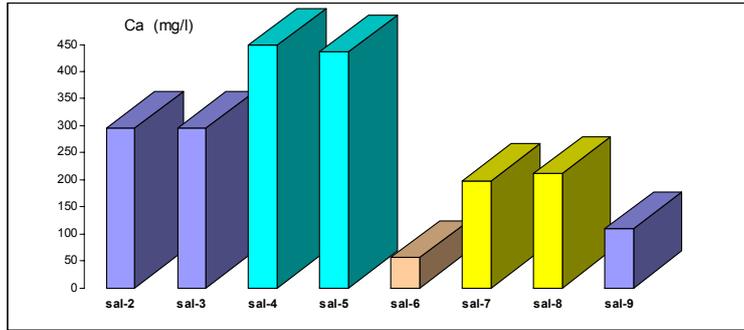
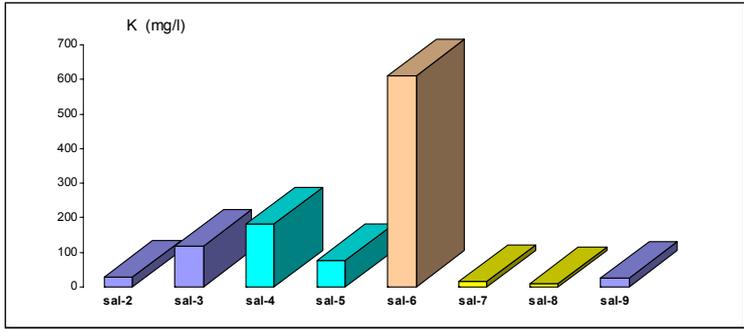
- il fiume Vaccarizzo nella stazione Sal 6 presenta elevato contenuto in Na con concentrazioni che raggiungono i 6932 mg/l e basso contenuto in Ca (56,42 mg/l); mentre anioni dominanti sono i cloruri con concentrazioni di 13289 mg/l;
- nelle stazioni Sal 5, Sal 4 e Sal 3, a valle della confluenza del Vaccarizzo nel Salso, si osserva un lieve progressivo aumento del contenuto in calcio mentre il catione dominante è il sodio. In tali stazioni, gli anioni dominanti sono i cloruri con concentrazioni intorno ai 5000 mg/l; mentre nella stazione Sal 3 si osserva una brusca diminuzione (2226 mg/l);
- nelle stazioni Sal 7 Sal 8 e Sal 2, abbiamo acqua di più bassa salinità di facies Na-Ca - Cl-SO<sub>4</sub>;
- nella stazione Sal 9, il catione dominante è il calcio, mentre i solfati con concentrazioni che raggiungono i 283,37 mg/l rappresentano i principali anioni.
- infine, dagli istogrammi delle variazioni delle concentrazioni ioniche, l'aumento di alcune concentrazioni ioniche tra le stazioni Sal 5 e Sal 6 è probabilmente dovuto alla presenza di un altro affluente del Fiume Salso le cui acque hanno un elevato contenuto in Mg, Na, K, Cl, SO<sub>4</sub>.

**Figura 4.4 - Bacino idrografico del Fiume Imera (le aste fluviali possono essere suddivise in sezioni a diversa salinità sulla base di estrapolazioni dedotte dalle ubicazioni delle stazioni di misura della conducibilità elettrica e da analisi delle caratteristiche geolitologiche)**



Figura 4.5 - Istogrammi delle concentrazioni ioniche nelle stazioni di prelievo

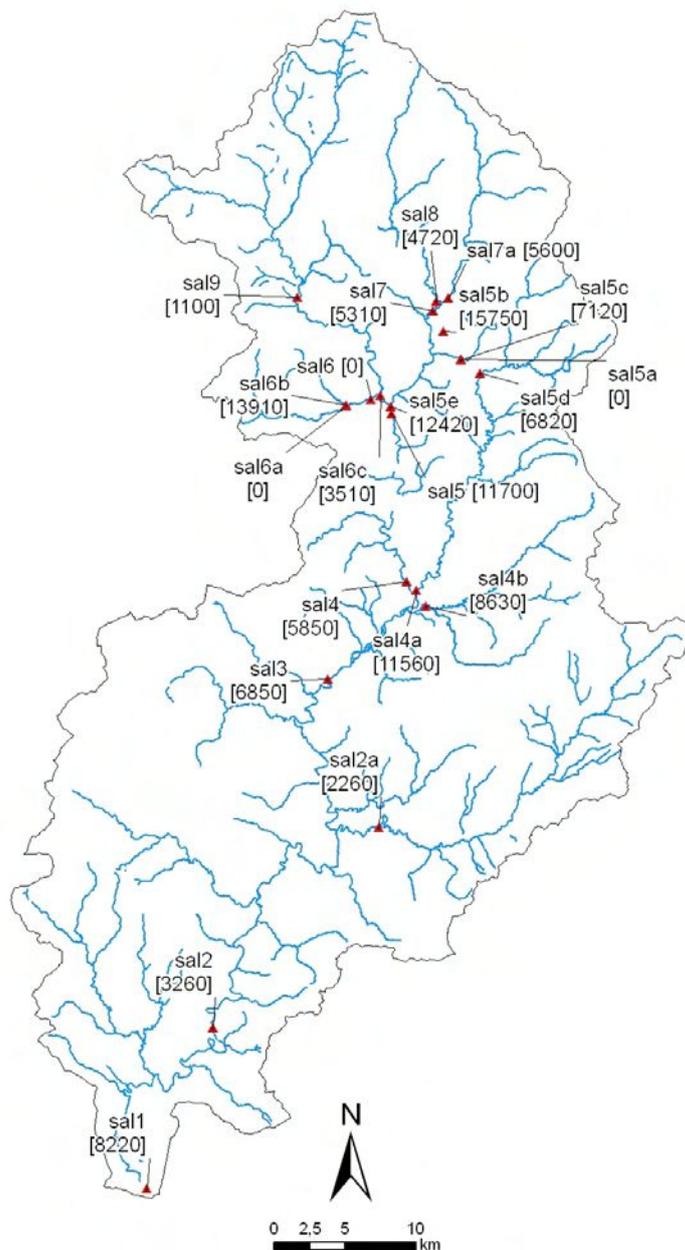




#### 4.2.2 Campagna giugno 2004

Dal 22 al 23 giugno 2004 è stata eseguita una seconda campagna di rilevamento delle caratteristiche chimico-fisiche del fiume Salso con prelievo di campioni per l'analisi dei principali anioni e cationi. Otto campioni (Sal 2 - Sal 9) sono stati prelevati presso i siti già campionati nell'Ottobre 2003, i restanti campionamenti sono stati invece effettuati presso siti intermedi o in aree nuove.

**Figura 4.6 - Campagna giugno 2004. Ubicazione dei punti di campionamento e analisi sulla rete idrografica del fiume Imera**



**Nota: i valori di conducibilità sono espressi in microS/cm, i valori "0" indicano fuori scala dello strumento**

I nuovi siti, selezionati attraverso l'elaborazione dei dati precedenti mediante un approfondimento delle conoscenze sulla geologia delle aree di interesse, hanno permesso di identificare, oltre agli affluenti precedentemente individuati, altre aree che contribuiscono agli incrementi di salinità del fiume Salso.

Valori di conducibilità molto elevati sono stati osservati nelle acque prelevate presso: ponte Fiume Morello (Sal 4 A C.E. = 11,91 mS/cm,) , Ponte cinque Archi (Sal 5, C.E.= 11,91 mS/cm,), Vallone Salito (Sal 5A C.E.= 30 ,60 mS/cm,), un affluente in sinistra idrografica del Fiume Salso (Sal 5B C.E.= 16,05 mS/cm,), Fiume Salso, a monte della confluenza con il Fiume Imera (Sal 5E C.E. = 12,66 mS/cm,), Torrente Vaccarizzo, briglia (6 = C.E. = 115,20 mS/cm,), Torrente Vaccarizzo, a monte del Torrente Cava (Sal 6A = 118,50 mS/cm,) e Torrente Cava, a monte della confluenza con Torrente Vaccarizzo (Sal 6B = 13,80 mS/cm.).

Queste acque mostrano anche elevate concentrazioni in cloruri, solfati, sodio, potassio, calcio e magnesio.

L'aumento della conducibilità osservata a valle del Ponte sul Salso (Sal 7 e Sal 8) in corrispondenza del punto di prelievo Sal 5E (12,66 mS/cm) sembra essere dovuto all'immissione dell'affluente in sinistra idrografica del fiume (Sal 5B, 16,05 mS/cm) e dell'affluente Vallone Salito (Sal 5A, 30,60 mS/cm e Sal 5C, 7,35 mS/cm).

L'immissione sul Fiume Imera Meridionale del Torrente Vaccarizzo (Sal 6, 115,20 mS/cm e Sal 6A, 118,50 mS/cm) e del Torrente delle Cave (Sal 6B, 13,8 mS/cm), che presentano conducibilità e concentrazioni di anioni e cationi molto elevate, non sembra comportare aumento della salinità. Infatti, il campione prelevato a monte della confluenza del Fiume Salso con l'Imera (Sal 5E 12,66 mS/cm) e quello prelevato in località ponte Cinque Archi (Sal 5 11,91 mS/cm), a valle della confluenza, presentano valori di conducibilità simili.

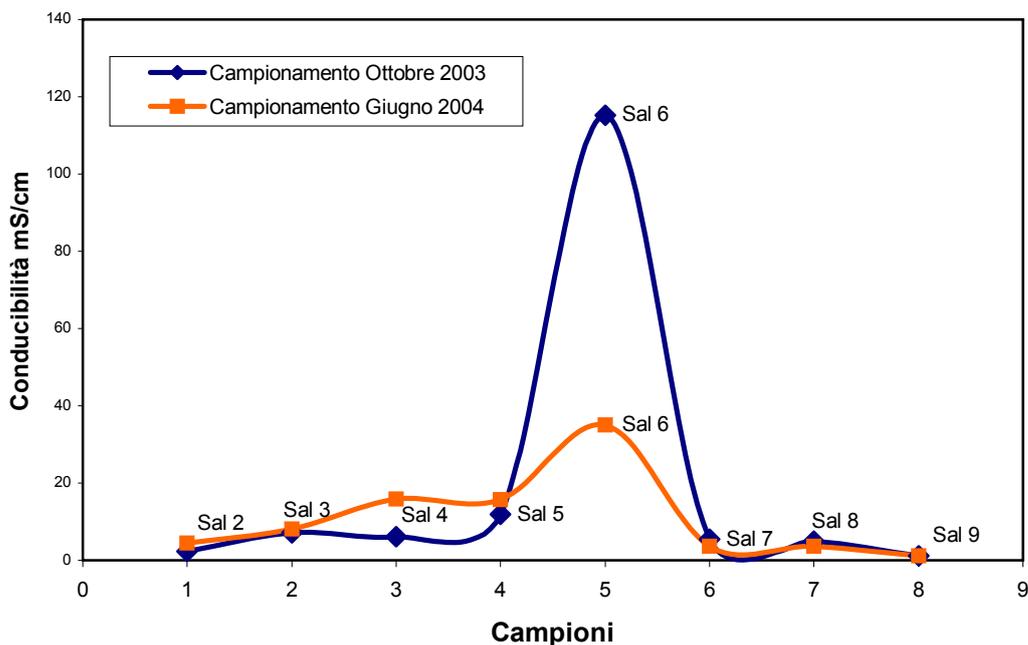
Elevata conducibilità ed alte concentrazioni di anioni e cationi, anche se inferiori a quelle del Torrente Vaccarizzo, sono state osservate anche per il Fiume Morello (Sal 4A, 11,91 mS/cm, Sal 5D e 7,12 mS/cm), ma la sua immissione nel Fiume Salso non sembra avere effetto sul valore della conducibilità.

Per quanto riguarda i siti campionati anche nell'ottobre 2003, i campioni Sal 6, Sal 7, Sal 8 presentano valori di conducibilità più alti di quelli osservati durante la campagna precedente, i campioni Sal 2 Sal 3, Sal 4 e Sal 5 hanno invece una conducibilità più bassa e per il Sal 9 il valore di conducibilità è rimasto invariato.

Come si osserva nella figura successiva, l'andamento della conducibilità dei campioni è simile a quello ottenuto nella campagna di prelievamento di giugno (Figura 4.7).

Infatti in entrambe le campagne valori di conducibilità molto elevata sono stati osservati per i campioni Sal 3, Sal 4, Sal 4 A, Sal 4 B, Sal 5, Sal 5 A, Sal 5 B, Sal 5 C, Sal 5 E, Sal 6, Sal 6 A, Sal 6 B.

**Figura 4.7 - Conducibilità misurata lungo il corso del fiume**



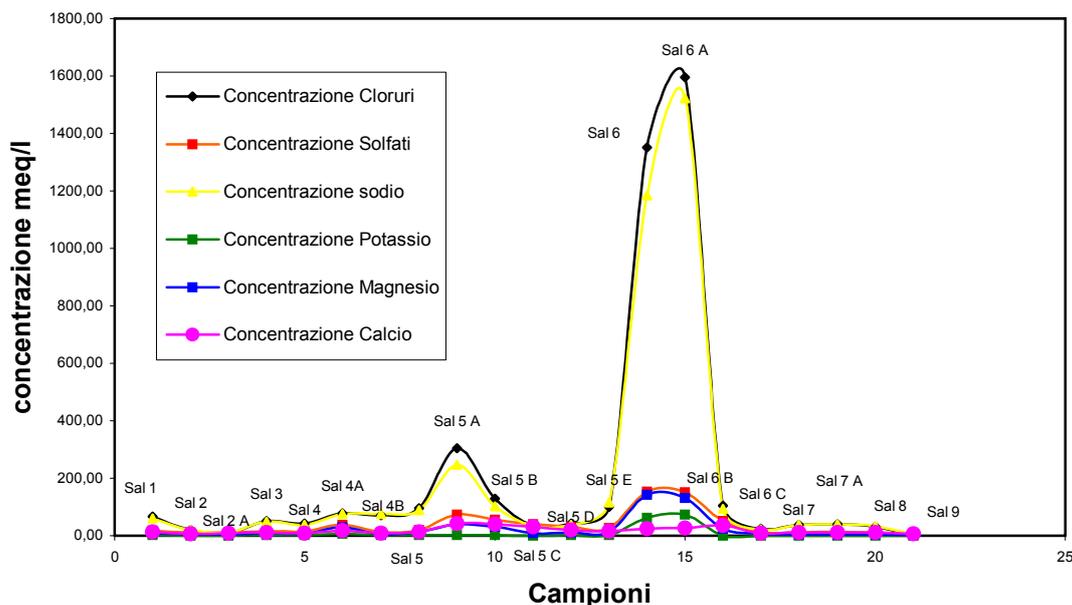
Abbiamo elaborato i dati delle concentrazioni in meq/L degli ioni cloruro, solfato, sodio potassio, calcio e magnesio nei campioni di acqua prelevati dal bacino idrico del fiume Imera Meridionale nel giugno 2004 e nell'ottobre del 2003.

In entrambe le campagne gli ioni cloruri e sodio sono stati rilevati in tutti i campioni in quantità maggiore rispetto agli altri ioni, ma mentre per i campioni Sal 6 e Sal 6 A la somma delle concentrazioni degli ioni sodio e cloruro costituisce il 90% della somma totale delle concentrazioni di tutti gli ioni presenti, per i restanti campioni la percentuale varia da un minimo del 26% a un massimo dell' 80%.

Nella Figura 4.8 sono riportate le concentrazioni in meq/L degli ioni cloruro, solfato, sodio, potassio, magnesio e calcio.

Anche l'andamento delle concentrazioni degli anioni e dei cationi risulta essere simile nelle due campagne di prelievo (Figure 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8).

**Figura 4.8 - Concentrazioni ioniche misurate lungo il corso del fiume**



#### 4.2.3 Campagna novembre 2004

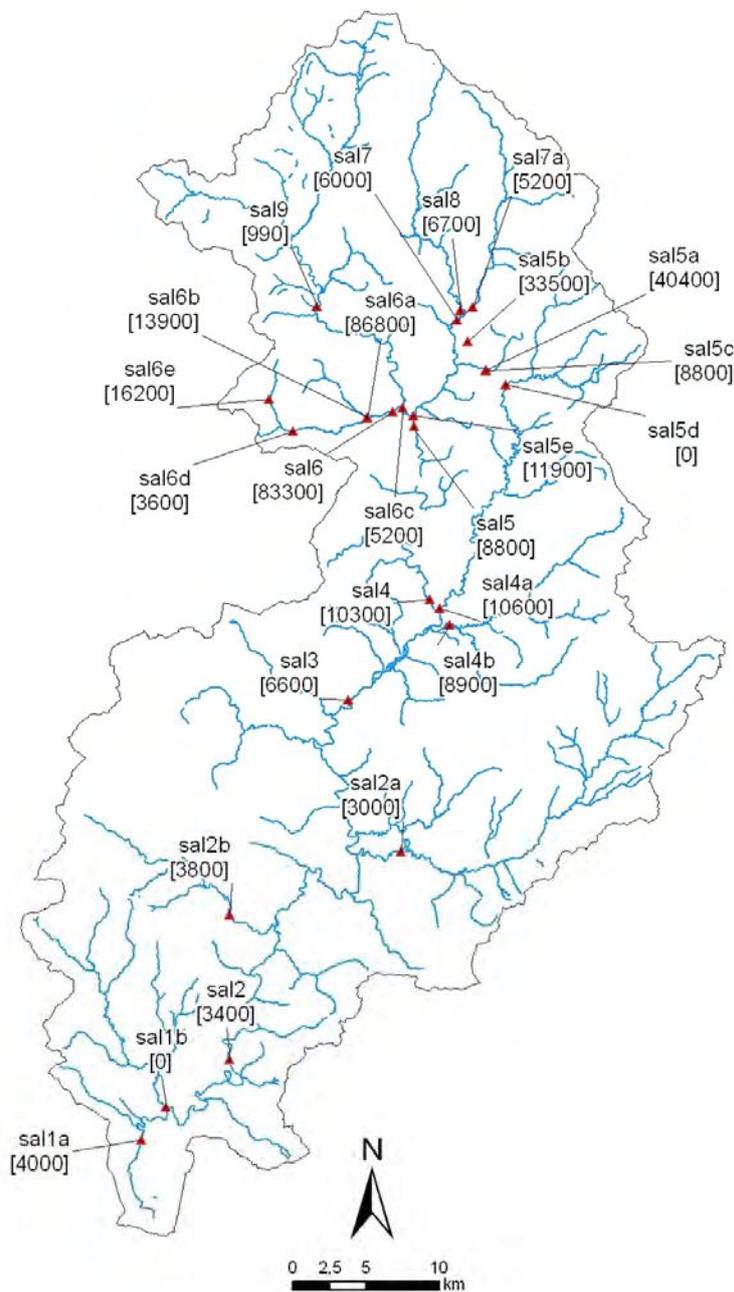
Nel mese di novembre 2004 sono stati ricampionati i siti del mese di giugno 2004 e individuati nuovi siti di interesse: torrente Garisi, fiume Gibbesi e quattro sorgenti.

Le analisi sono state eseguite rimisurando le conducibilità, già misurate *in situ*, in laboratorio mediante conduttimetro Crison, mod. Basic 30 e la concentrazione degli anioni e cationi sono state determinate mediante cromatografia ionica soppressa con rilevatore a conducibilità.

Comparando l'andamento della conducibilità dei campioni prelevati a giugno e novembre 2004, si osservano simili andamenti delle conducibilità. Infatti in entrambe le campagne valori di conducibilità molto elevata sono stati osservati per i campioni Sal 3, Sal 4, Sal 5 e Sal 6.

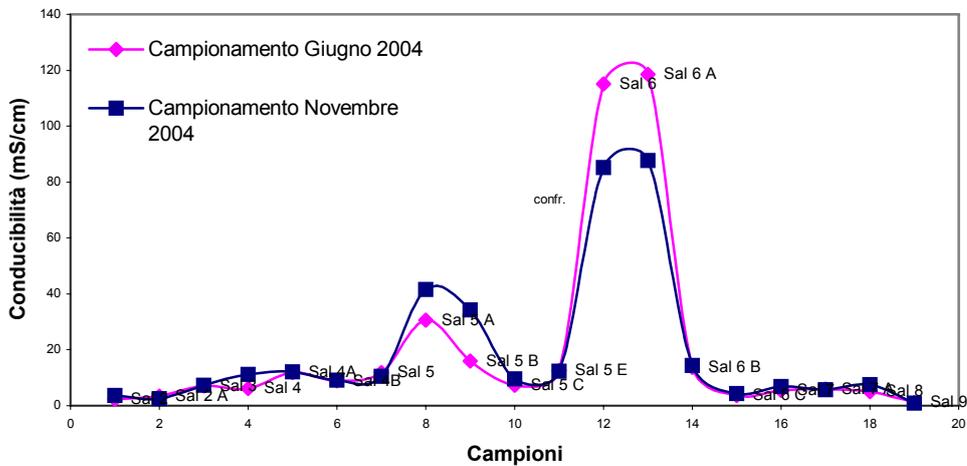
Dalle analisi chimiche si osserva che il rapporto fra i vari cationi ed anioni non è costante fra i vari tratti del fiume e ciò conferma la presenza di sorgenti di inquinamento le cui acque interagiscono probabilmente con gli affioramenti di rocce evaporitiche nei vari bacini; è interessante notare che le anomalie di concentrazione nelle stesse stazioni di analisi sono comparabili.

**Figura 4.9 - Campagna novembre 2004. Ubicazione dei punti di campionamento sulla rete idrografica e valori di conducibilità misurati in situ**

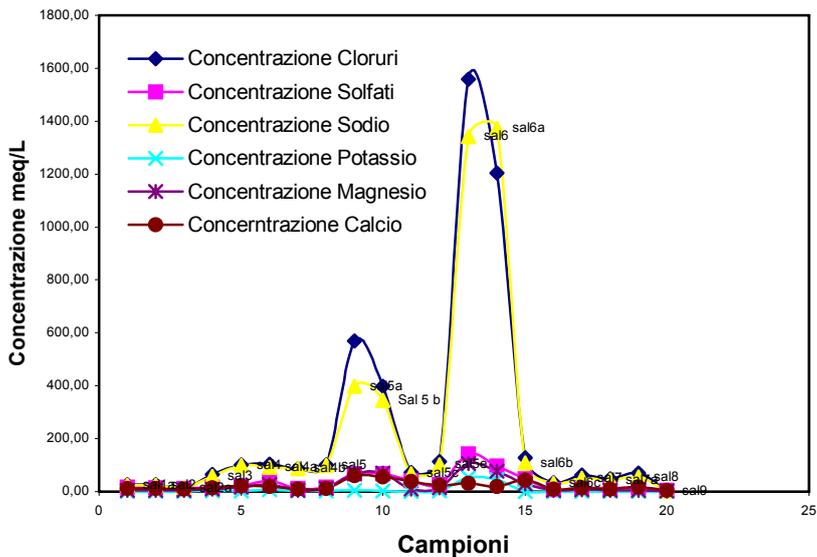


Nota: i valori di conducibilità sono espressi in microS/cm

**Figura 4.10 - Conducibilità misurata lungo il corso del fiume**



**Figura 4.11 - Concentrazioni ioniche rilevate nella campagna di novembre 2004**



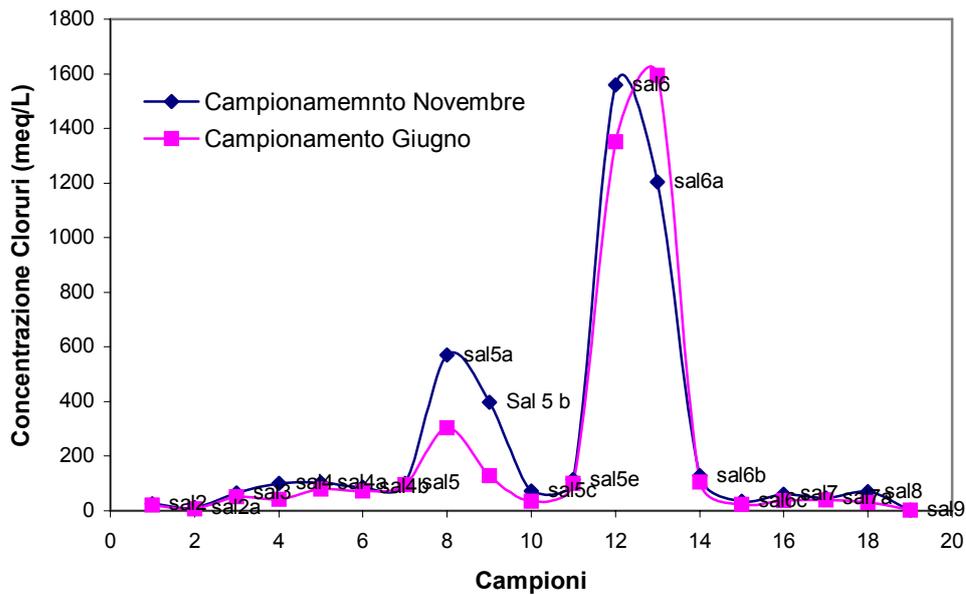
Per visualizzare meglio, nelle due campagne di prelievo, il simile andamento delle concentrazioni degli anioni e dei cationi, sono state diagrammate le concentrazioni in meq/L degli ioni cloruro, solfato, sodio, potassio, magnesio e calcio (Figura 4.11).

Per quanto riguarda le quattro sorgenti campionate, solo per la sorgente Mindica sono stati osservati elevati valori di conducibilità (6,25 mS/cm) e di concentrazione di anioni e cationi (Figura 4.18).

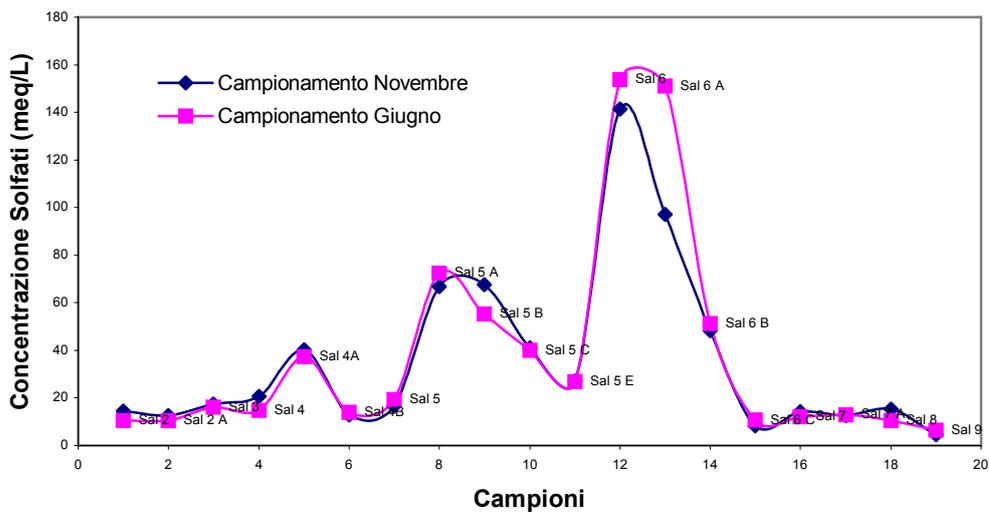
Dei due campioni prelevati presso il torrente Garisi denominati Gar 1 e Gar 2, solo il secondo presenta una conducibilità molto elevata (13,52 mS/cm) ed elevate concentrazioni di anioni e cationi.

Infine il campione denominato Gibbesi ponte, prelevato presso il fiume Gibbesi presenta una conducibilità pari a 3,15 mS/cm.

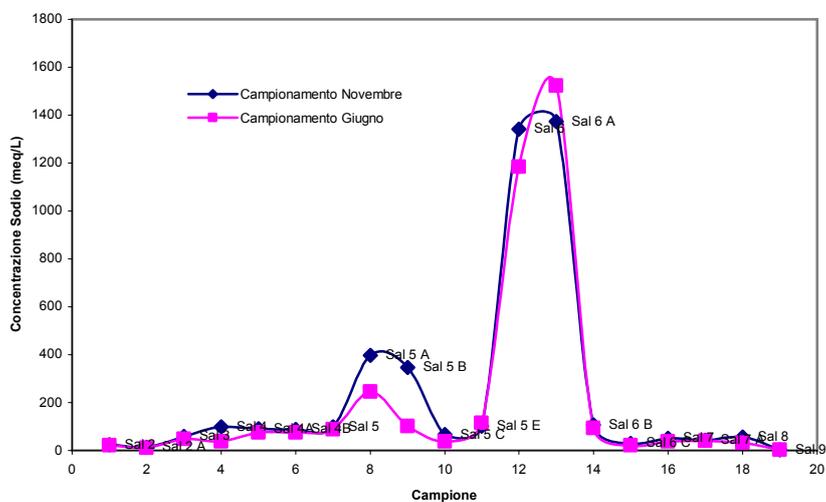
**Figura 4.12 - Concentrazione dei cloruri nei campioni prelevati a giugno e novembre 2004**



**Figura 4.13 - Concentrazione dei solfati nei campioni prelevati a giugno e novembre 2004**



**Figura 4.14 - Concentrazione di sodio rilevata nei campioni prelevati a giugno e novembre 2004**



**Figura 4.15 - Concentrazione di potassio rilevata nei campioni prelevati a giugno e novembre 2004**

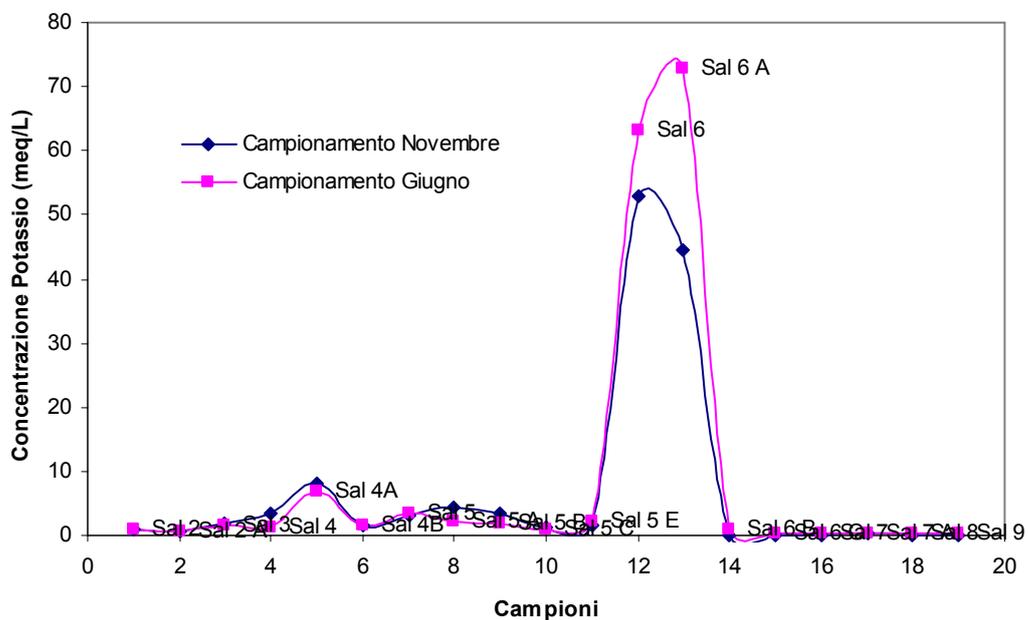


Figura 4.16 - Concentrazione di calcio nei campioni prelevati a giugno e novembre 2004

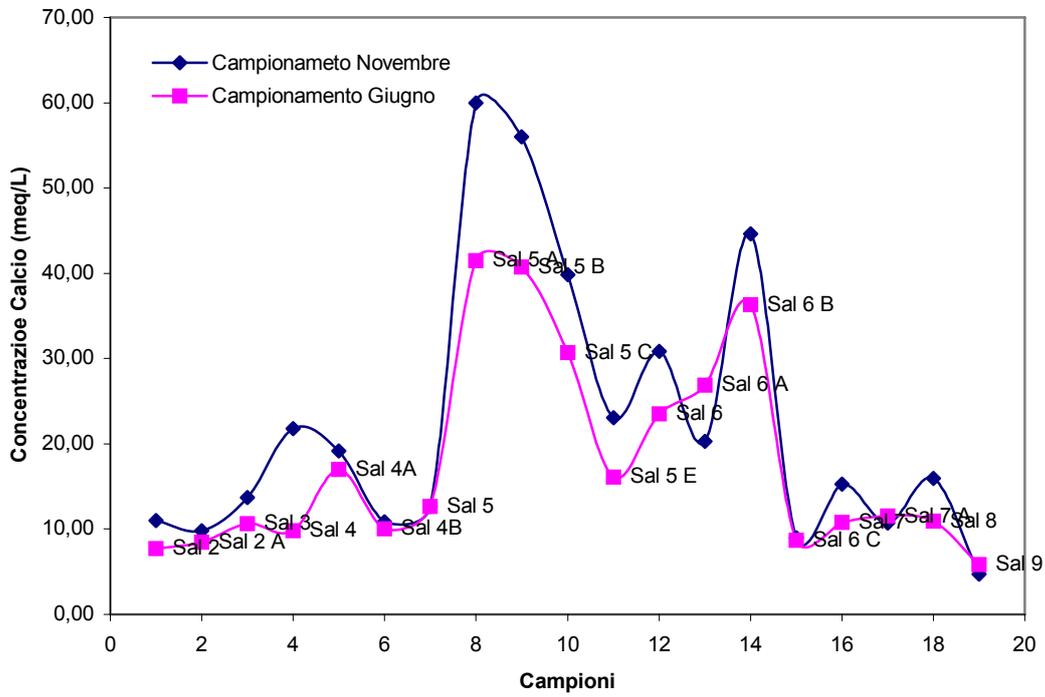
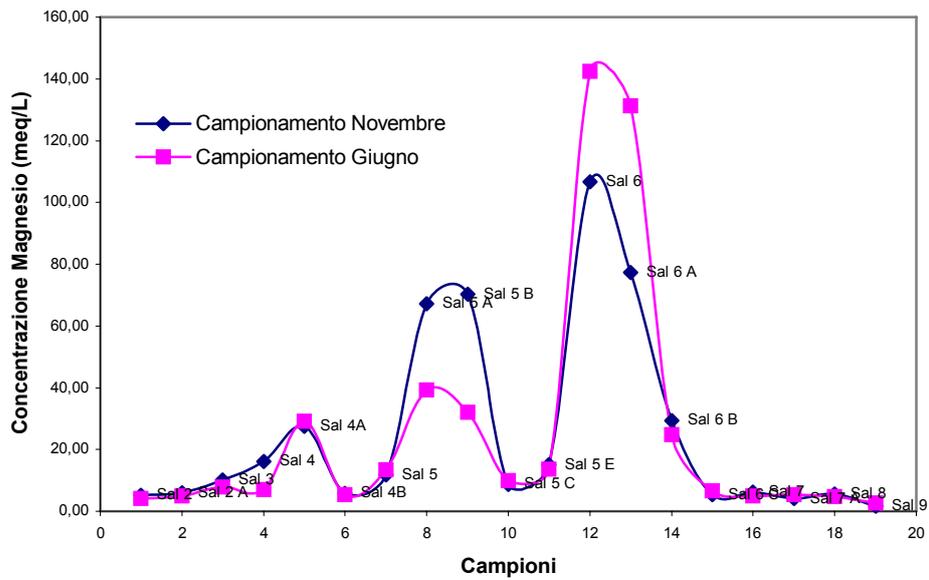
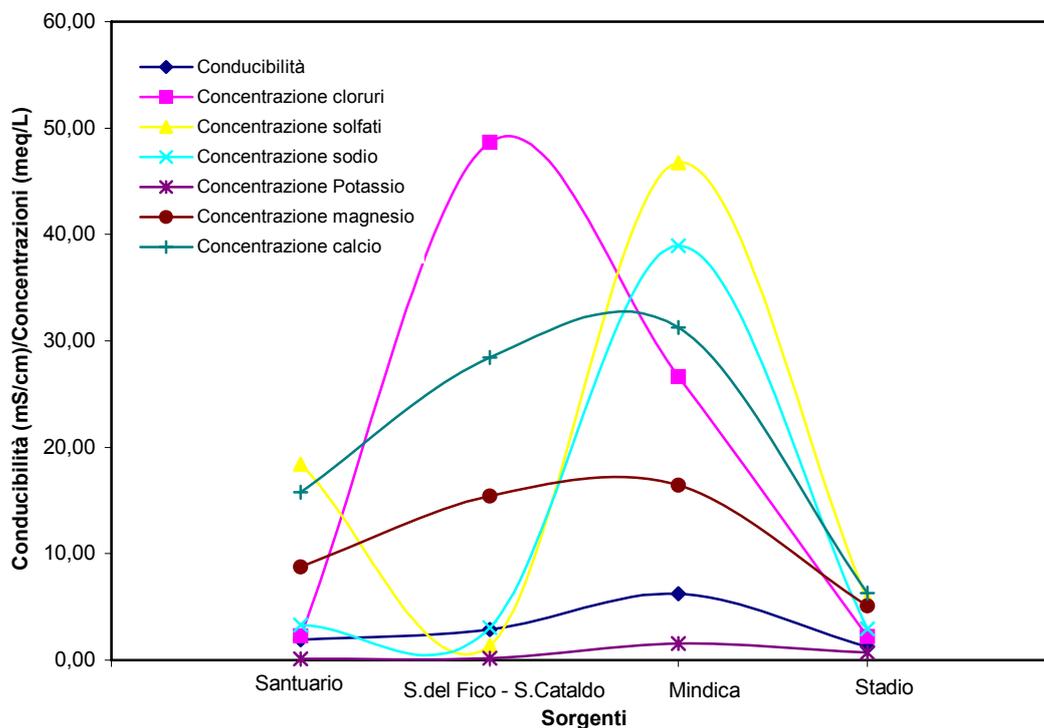


Figura 4.17 - Concentrazione di magnesio nei campioni prelevati a giugno e novembre 2004



#### 4.18 - Conducibilità e concentrazione degli ioni cloruro, solfato, sodio, potassio, magnesio e calcio dei campioni prelevati presso le sorgenti nel novembre 2004



#### 4.2.4 Campagna maggio 2005

Per la caratterizzazione della qualità delle acque fluviali del Fiume Salso, alla scala del bacino idrografico, nel mese di maggio 2005 è stata realizzata una campagna di prelievo di acque in 7 stazioni (Tabella 4.1), e sono state eseguite indagini di dettaglio nel torrente Vaccarizzo.

Durante la campagna di misura sono stati rilevati *in situ* valori di conducibilità elettrica significativamente maggiori di quelli misurati durante la campagna del 2003. Tali dati evidenziano bruschi ed improvvisi peggioramenti delle caratteristiche chimico-fisiche delle acque, probabilmente dovuti ad alimentazione in sub alveo dei corsi d'acqua da parte dell'acquifero, per fenomeni di emergenza delle acque di falda in corrispondenza del contatto fra le rocce permeabili che ospitano l'acquifero e le rocce impermeabili solifere. L'attività di campagna nel maggio 2005 è avvenuta in un periodo di assenza di eventi meteorici significativi, per cui gli apporti idrici ai corsi d'acqua derivanti dagli acquiferi sono da ritenersi significativi.

**Tabella 4.1 - Stazioni di prelievo. Campagna maggio 2005**

<b>Sigla</b>	<b>Ora [UTC+2]</b>	<b>Località</b>	<b>CE [<math>\mu</math>S/cm] 22.05.05</b>
SAL 1	9.31	Licata (foce)	>20000
SAL 1A	10.16	C.da Stretto	5530
SAL 2	10.56	Drasi	9280
SAL 4A	12.02	Capodarso (Morello)	8320
SAL 4B	12.19	Capodarso (Torcicoda)	10040
SAL 4	12.37	Capodarso (Salso)	17060
SAL 5	14.57	Cinque Archi	16560

I bassi apporti idrici e quindi le modeste portate sono responsabili del forte degrado delle risorse nel tratto terminale del fiume Salso, in esso l'incremento di salinità fa sì che alla foce non essendovi una significativa differenza di salinità, non si realizza la barriera idraulica di acqua dolce in grado di impedire l'ingressione di acque salate dal mare, idraulicamente non contrastate dal flusso di acque dolci, per cui nei periodi di magra la salinizzazione della foce è significativa.

Sulla base delle variazioni del chimismo lungo l'asta fluviale e da considerazioni geologiche è stata selezionata l'area del torrente Vaccarizzo per un approfondimento dello studio dei processi di desertificazione.

#### **4.2.5 Criteri per la selezione del torrente Vaccarizzo**

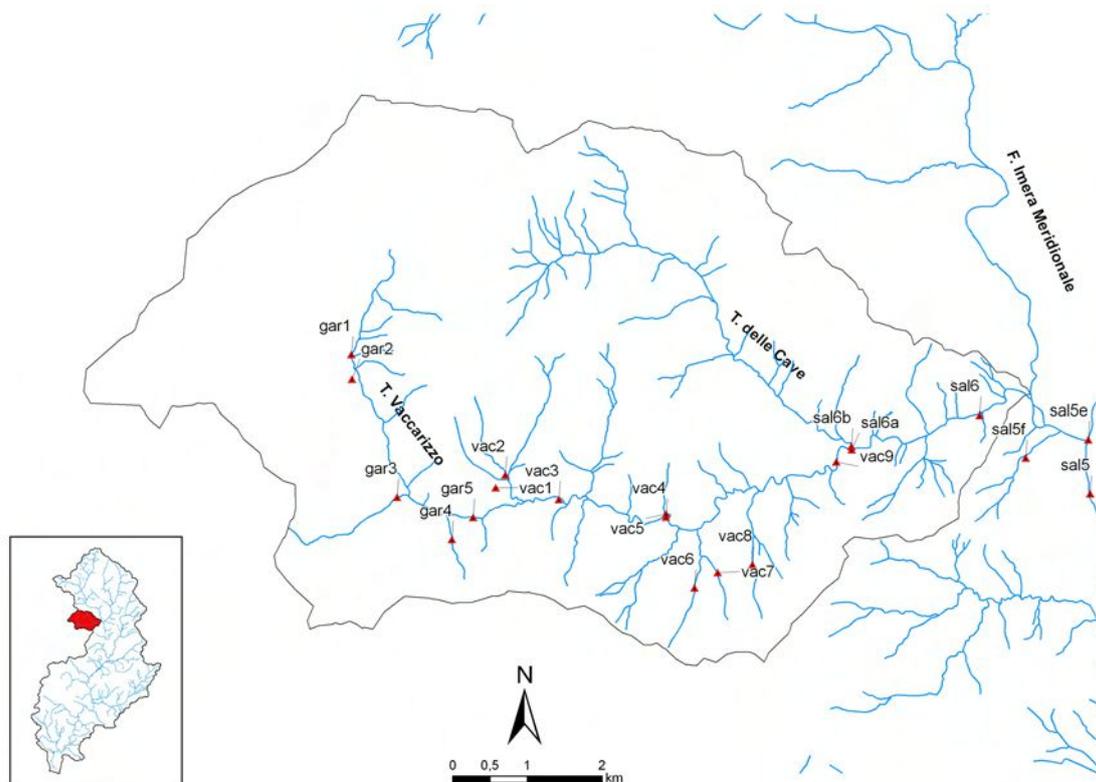
Le campagne di prelievo precedentemente illustrate hanno permesso di focalizzare l'attenzione nelle aree più problematiche e di confermare l'idoneità delle stazioni selezionate nella prima fase per il monitoraggio del Fiume Salso.

Fra le aree critiche particolarmente interessante è risultato il torrente Vaccarizzo, sia per l'importante contributo che dà alla salinizzazione del Salso, nonostante la sua piccola estensione, sia per la natura delle sostanze inquinanti da esso immesse, costituite non solo da elevati valori in sali solubili, ma anche e soprattutto da elementi tossico-nocivi quali ad esempio l'arsenico.

Dai dati disponibili risulta evidente che lo sviluppo di strategie di mitigazione e bonifica del fiume richiede l'individuazione di misure in grado di ridurre gli apporti inquinanti da questo fiume.

Per tutte queste considerazioni si è provveduto a indagare in dettaglio questo sottobacino, eseguendo misure *in situ* dei valori di conducibilità elettrica, pH e di temperatura delle acque.

**Figura 4.19 - Campagna maggio 2005. Ubicazione dei punti di campionamento sulla rete idrografica del torrente Vaccarizzo**



L'elaborazione dei dati delle concentrazioni ioniche principali (Ca, Mg, K, Na, Cl, SO<sub>4</sub> e NO<sub>3</sub>) ha permesso infatti di:

- distinguere le aste fluviali con elevata salinità che raggiungono i 35,0 mS/cm da quelle a bassa salinità con valori pari a 1,0 mS/cm;
- identificare nel fiume Vaccarizzo (stazione Sal 6) uno dei maggiori contributi all'incremento di salinità. Le analisi evidenziano un elevato contenuto di sodio e potassio e un basso contenuto di calcio. Gli anioni dominanti sono i cloruri, che hanno evidenziato un incremento rispetto alla campagna del 2004;
- constatare elevate concentrazioni di alcuni elementi in tracce ad elevata tossicità nella stazione Sal 6.

### **4.3 Bacino idrografico del torrente Vaccarizzo**

Il bacino idrografico del torrente Vaccarizzo rappresenta in pieno le problematiche di inquinamento naturale delle risorse idriche dovuto alla concomitanza di fattori climatici e litologici, in quanto ricade nell'area centrale e meridionale della Sicilia dove prevalgono estesi affioramenti di rocce argillose e rocce evaporitiche. In particolare fa parte della stretta fascia, larga al massimo 20 km, che da Nicosia si sviluppa fino a Sciacca in cui sono presenti discontinui depositi evaporitici appartenenti alle fasi finali di precipitazione, per cui in essa si osservano depositi completi della serie di deposizione comprendenti, oltre ai calcari e i gessi, sali sodici e potassici.

Sono presenti depositi ricchi in elementi ad elevata solubilità tossico-nocivi, che tendendo a rimanere in soluzione si depositano solo quando le loro concentrazioni si sono talmente arricchite nei liquidi residuali da permetterne la deposizione.

Tale area, descritta in dettaglio da Decima e Wezel nel 1971, consiste di numerosi piccoli corpi con andamento nord-est sud-ovest nel cui nucleo possono essere presenti corpi di sali sodici e potassici caratterizzati da notevoli spessori (in alcuni casi caratterizzati da accumuli di sali che risalgono per diapirismo).

La presenza di corpi localizzati di Salgemma di piccola estensione, ma notevole spessore, spiega il consistente contributo in cloruri degli affluenti alimentati da acque di sorgenti provenienti da tali litologie.

Le litologie del Complesso di Caltanissetta sono state interessate da un'importante fase tettonica compressiva nel pliocene medio, nota con il nome di fase tardorogena, che ha prodotto in Sicilia la falda tardorogena di Gela e nell'area di interesse dello studio importanti pieghe tettoniche che definiscono a scala regionale strutture a grande raggio con assi diretti all'incirca nord-est sud-ovest, quindi ortogonali rispetto allo sviluppo del bacino del fiume Imera Meridionale. Una di queste grandi strutture condiziona la geometria della fascia di giacimenti di salgemma della Sicilia descritti da Decima e Wezel (1973).

Il bacino del torrente Vaccarizzo ha la zona montana del torrente Garisi, affluente in destra idrografica, impostata su una sinclinale formata dai sedimenti terrigeni che separa il sinclinorio del Salso Superiore e dell'Imera superiore dal sinclinorio in cui dominano gli affioramenti di salgemma dell'area compresa fra Alimena, Villadoro, Villarosa e S. Caterina di Villermosa (Roda, 1971).

Non è quindi casuale quanto osservato nelle campagne di misura effettuate nell'ambito del progetto dalle quali emerge il forte peggioramento della qualità delle risorse idriche in corrispondenza dei contributi da parte dei corsi d'acqua che provengono da tale area.

Già Roda, nel 1971, studiando il chimismo del torrente Vaccarizzo (dall'ottobre 1963 al settembre 1964) aveva stimato un contributo annuo di circa 60.000.000 di kg di salgemma sul Salso, e quindi un contributo consistente da tale area. Nell'area del bacino del Vaccarizzo prevalgono litologie terrigene di composizione argillose che essendo impermeabili non ospitano risorse idriche, per cui gli acquiferi in questa area della Sicilia insistono prevalentemente in rocce della serie evaporitica in cui la presenza di cloruri, sodici e potassici estremamente solubili forniscono un significativo contributo alla qualità delle acque superficiali e sotterranee.

In particolare in questa area il salgemma è contenuto non solo nei corpi diapirici di cloruri, ma anche in unità evaporitiche arenaceo-argillose e nelle sottili intercalazioni di gesso e di anidrite.

Il torrente Vaccarizzo è ubicato nel territorio a nord dell'abitato di S. Caterina di Villarmosa, piccolo borgo collinare seicentesco in provincia di Caltanissetta, dominato a nord dal massiccio di Monte Matarazzo (823 m), ad ovest dalla catena di Filo delle Rocche (832) e a sud-est dal Monte Fagaria (813 m). Il torrente, con sviluppo est-ovest, affluente del fiume Imera, riceve in prossimità della sua area sorgente le acque del torrente Garisi.

Le sequenze litologiche presenti nel bacino del torrente Vaccarizzo sono costituite da una successione sedimentaria che va dal Miocene all'attuale.

Questo bacino idrografico presenta la sequenza evaporitica completa, in cui sono presenti anche i depositi salini dovuti alla fase di massima evaporazione, che rappresentavano le aree più profonde del bacino in cui si erano accumulati i liquidi residuali ricchi nei sali più solubili, e in queste aree si rinvenivano i rari affioramenti in sali potassici, che come è noto rappresentano gli ultimi prodotti del ciclo evaporitico (sali che per la loro rarità rivestono notevole interesse economico).

In particolare nell'area in esame affiorano i gessi delle due unità riconosciute da Decima e Wezel (1971), una inferiore (gessi di Cattolica Eraclea) ed una superiore (gessi di Pasquasia), separate da una discordanza. L'area è inoltre rappresentativa delle valenze paesaggistiche ed ecologiche legate ai paesaggi carsici evaporitici, che come è noto sono rari e di limitata estensione. L'Italia, grazie all'abbondanza di affioramenti evaporitici stimati in circa 1% delle litologie affioranti sul territorio nazionale, la maggior parte affioranti in Sicilia nel Bacino sedimentario di Caltanissetta, rappresenta una delle aree di maggior interesse per la salvaguardia delle risorse biologiche e naturali altamente specializzate che in tale contesto si sono sviluppate.

#### **4.3.1 Considerazioni sui contributi inquinanti del torrente Vaccarizzo**

Durante la campagna di maggio 2005, oltre a riesaminare le risorse idriche nella rete di monitoraggio analizzata nel novembre 2004, è stato condotto il rilevamento delle caratteristiche chimico-fisiche delle acque superficiali nel bacino del Vaccarizzo. L'elevata salinità non ha permesso di eseguire in tutti i punti misure di temperatura in quanto il conduttivimetro risulta instabile e le operazioni di diluizione, che ci hanno permesso di determinare la conducibilità elettrica *in situ*, alterano la temperatura, per cui tale dato non viene riportato.

Il bacino del Vaccarizzo può essere suddiviso in tre tratti, il tratto montano (bacino del torrente Garisi) in cui i contributi idrici derivano da formazioni terrigene che forniscono acque a bassa salinità. Questo torrente, man mano che si approssima alla confluenza con il torrente Vaccarizzo, riceve contributi da torrenti alimentati da sorgenti carsiche impostate nei gessi, per cui si ha un graduale incremento nella conducibilità elettrica e di conseguenza della salinità. Tali incrementi producono un peggioramento della qualità delle acque non drammatico, per cui l'eliminazione di questi contributi potrebbe costituire un miglioramento ma non essere determinante.

Un importante salto di salinità si ha alla confluenza delle acque del torrente Garisi con il torrente Vaccarizzo, caratterizzato da acque ricche in solfati dovuti alla presenza di numerose sorgenti alimentate da un sistema carsico impostato sui gessi. La salinità è elevata ma consente in ogni caso lo sviluppo lungo l'alveo di vegetazione costituita prevalentemente da canna di palude. Un importante contributo all'incremento della salinità nel torrente Vaccarizzo si ha in prossimità della confluenza con il torrente Cava. In questo tratto si ha, nella zona di subalveo, l'emergenza dell'acquifero impostato su un probabile contatto fra i gessi e corpi di sali di sodio e potassio. È probabile che il contributo di arsenico e degli altri metalli ad elevata tossicità derivi da questa emergenza. Se tale ipotesi fosse verificata basterebbe intercettare l'acquifero responsabile degli apporti ad elevata salinità per produrre un significativo miglioramento lungo tutta l'asta fluviale dell'Imera, e rendere efficace la diluizione responsabile dei miglioramenti di qualità osservati nei tratti a valle della Stazione di Capodarso.

Infatti, a sud di tale area, i contributi da acquiferi a contatto con il salgemma sono trascurabili e inoltre la presenza delle calcareniti del pleistocene produce l'emergenza di sorgenti di buona qualità che forniscono ai corsi d'acqua superficiali acque a bassa salinità e contribuiscono a migliorare, per diluizione, la qualità delle acque del fiume.

#### **4.4 Probabili cause del degrado delle risorse idriche nel bacino di Caltanissetta**

L'analisi geochemica delle acque effettuata lungo i principali punti di confluenza degli affluenti del Fiume Imera Meridionale ha permesso di individuare, in alcune aree del Bacino di Caltanissetta, le sorgenti di inquinamento del fiume, e di restringere il numero di stazioni per il monitoraggio dello stato qualitativo dell'Imera Meridionale.

L'attività di ricerca ha permesso inoltre di confermare che la composizione geochemica delle acque del fiume è fortemente influenzata da apporti localizzati e puntuali, dovuti principalmente a processi geochemici naturali di solubilizzazione delle litologie evaporitiche.

È noto che ulteriori contributi sono dovuti a deflussi delle acque dalle miniere ed in particolare dalle interazioni acqua-roccia nelle aree in cui sono presenti discariche di miniere. Fortunatamente esistono molte informazioni sull'attività mineraria, sulle miniere e le relative discariche poiché sono state recentemente censite dalla Regione Sicilia in applicazione del DM 471. Lungo l'Imera sono da considerare trascurabili gli apporti inquinanti antropici sia per la bassa urbanizzazione sia per l'assenza, nella Sicilia centrale, di importanti siti industriali.

In alcuni casi i reflui depurati, immessi nel fiume o nei suoi affluenti, forniscono un contributo di diluizione della salinità. Ciò grazie alla distribuzione di acqua di ottima qualità per uso domestico proveniente dagli acquiferi delle Madonie.

## 5. CARATTERIZZAZIONE IDROGEOLOGICA E GEOCHIMICA DELLA FASCIA COSTIERA DEL TERRITORIO DI LICATA

Carmela Vaccaro, Dimitra Rapti Caputo

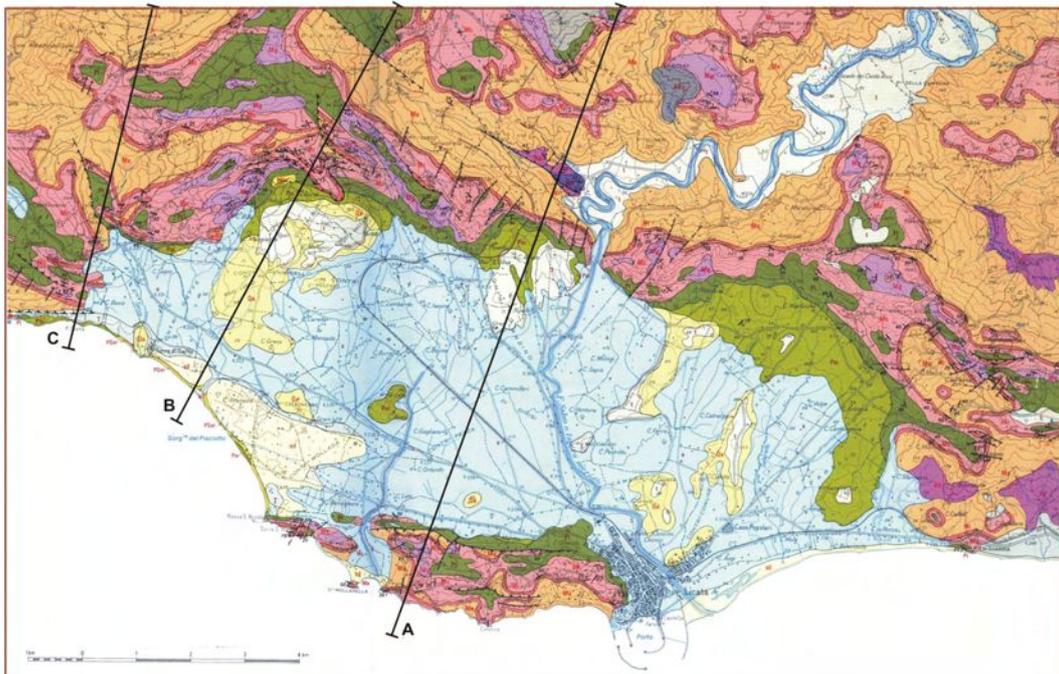
### 5.1 I lineamenti geologici della fascia costiera di Licata

In letteratura un significativo contributo alla conoscenza della geologia dell'area di Licata è stato fornito dalla pubblicazione della Carta Geologica (Grasso, 1998)

Nell'area di studio si distinguono le seguenti formazioni geologiche:

- *(sd)* sabbie eoliche e dune recenti;
- *(a)* depositi alluvionali recenti ed attuali (olocenici) costituiti prevalentemente da lenti limose, sabbiose e talvolta ghiaiose. Lo spessore non supera i 10 metri;
- *(t)* depositi alluvionali ben terrazzati del Pleistocene Medio-Superiore. Si tratta di sabbie fini di colore rossastro con ciottoli ben arrotondati di natura prevalentemente quarzarenitica oltre che calcarea; affioranti nella piana di Licata in località di Casa, nel settore settentrionale della contrada Calandino e nel settore settentrionale della contrada Comune a quote comprese tra i 40 e 80 metri;
- *(T)* depositi marini terrazzati del Pleistocene Medio-Superiore, affioranti nel settore occidentale in una fascia di direzione nordovest-sudest tra Torre di Gaffe e Grasciur, e in una area a nord di Torre San Nicola. Si tratta di depositi sabbiosi di colore bruno giallastro nei quali è evidente la presenza dei ciottoli quarzarenitici appiattiti;
- *(Qa)* depositi argillosi siltosi di colore giallastro a stratificazione quasi 'caotica' coprono il sinclinale di Licata. Lo spessore di tali depositi, di età Pleistocenica inferiore, localmente supera i 400 metri;

Figura 5.1 - Carta geologica della piana di Licata



- **(Pm)** *argille marnose* grigio–azzurre a stratificazione indistinta, di età pliocenica superiore, si incontrano alle estremità della sinclinale di Licata nei pressi della città di Licata, ed a ovest in località Torre di Gaffe;
- **(Pt)** *Trubi*, si tratta marne calcaree e calcari marnosi bianchi a fratturazione concoide del Pliocene inferiore. Si presentano molto spesso con una fratturazione prismatica normale alla stratificazione, a spessore variabile tra i 50 e i 150 metri;
- **(Mg)** *Gessi laminati e gessi selenitici* a grossi cristalli geminati in banconi dello spessore di circa 5-7 m con intercalati livelli decimetrici di marne verdastre ed argille grigio-nerastre. Lo spessore di tale formazione di età messiniana, può raggiungere localmente gli 80 metri. Il tipo più frequente di gesso è quello a cristalli grossi geminati a ‘coda di rodine’ ed il gesso straterellato lastriforme (balatino);
- **(Mc)** *Calcare di base* di età Messiniana. Si tratta di calcari brecciati vacuolari derivanti dalla dissoluzione di originari cristalli di salgemma con residui bituminosi e calcari bianco-grigiastri a laminazione parallela in balconi di spessore metrico separati da livelli pelitici decimetrici. Lo spessore di questo litotipo molto variabile con valori medi di circa 30 metri, talvolta però può raggiungere il centinaio di metri;
- **(Mt)** formazione di Tripoli di età Messiniana costituita da diatomiti bianche fogliettate alcune volte bituminose e argillose con evidente la presenza dei resti di pesci Teleostei, Cocolitoforidi e Dinoflagellati alternate ad argille nerastre e marne brune. La natura di questi fossili ed il ridotto numero delle specie di pesci documentano la presenza di un ambiente deposizionale salmastro;
- **(Ma)** *Formazione di Licata* (Ogniben, 1954) costituita da argille marnose grigio-azzurre che contengono nella parte superiore livelli limonitici di alcuni centimetri ricchi di placton che corrispondono ai momenti di scarsa sedimentazione pelitica che delimitano partimenti argillosi di spessore variabile tra i 0,1 e 2 metri. Lo spessore complessivo di tale formazione, di età Lannghiano Inferiore-Tortoniano Superiore, può raggiungere i 400 metri. La formazione di Licata affiora principalmente in corrispondenza dell’anticlinale di Contrada Marotta, presso Contrada Gaffe e nella zona costiera dal porto di Licata alla Rocca di San Nicola. Il passaggio con la formazione di Tripoli è graduale ed è dato dall’alternanza di livelli marnosi grigio-verdastri con livelli di marne tripolacee;
- **(AV)** *Argille varicolori* del Miocene inferiore. Si tratta di una formazione prevalentemente argillosa a colori variabili tra il rosso, bruno e grigio verdastro con intercalazioni di strati marnosi (color bianco) e calcari micritici. Lo spessore affiorante di tale formazione può localmente raggiungere gli 80 metri. Nella piana di Licata, tale formazione affiora in destra idrografica del fiume Salso, in un’area limitata a nord dal torrente Passarello e a sud dal torrente Fucile; e nell’estremo settore orientale, in sinistra idrografica del V<sup>ne</sup> della Palma in località Casa Bonvissuto e contrada Cantigaglione.

Dal punto di vista strutturale, gli elementi tettonici dominanti sono rappresentati a) dalla sinclinale di Licata con direzione NO-SE; b) dalla struttura sinclinica della Contrada Vallone Secco e c) dall’anticlinale di Contrada Gaffe.

**Figura 5.2 - Un vecchio pozzo a mattoni della piana**



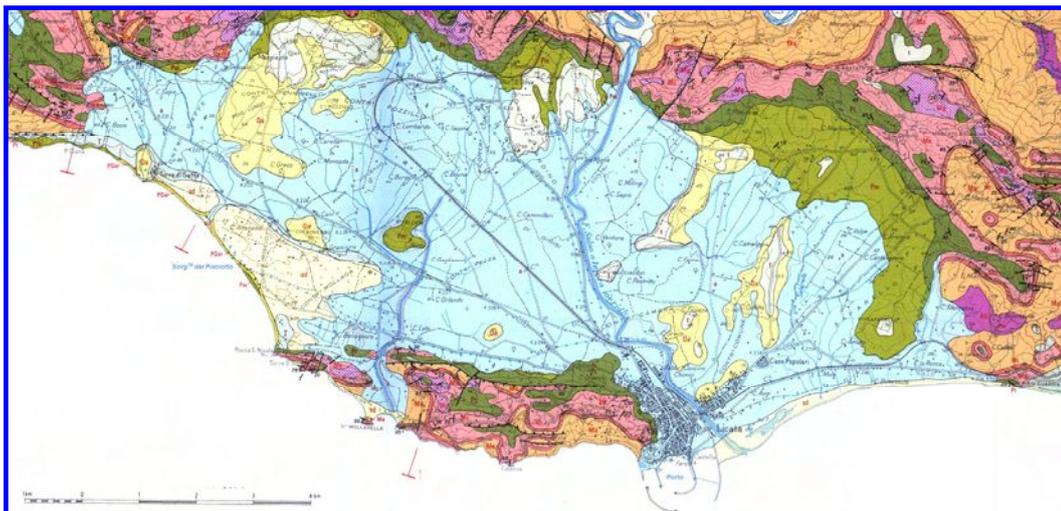
Tali strutture sono localmente accompagnate da faglie inverse che accentuano il raccorciamento mentre le faglie dirette, quando sono presenti, sono generalmente circa perpendicolari agli assi delle pieghe e di piccolo rigetto.

Nell'area di studio, i maggiori raccorciamenti si osservano a nord della piana di Licata, dove la successione gessoso solfifera, a causa di una faglia inversa, sovrascorre sulle argille plio-pleistoceniche.

## **5.2 Idrogeochimica**

Nelle zone a clima semi-arido come quella della piana di Licata, la modalità di gestione delle risorse idriche sotterranee ha un ruolo fondamentale nello sviluppo economico di tutte le attività agricole. La scarsità di acqua, oppure la presenza delle acque ad elevata salinità, può avere conseguenze disastrose sull'economia locale. In particolare, nella zona della pianura affiorano le seguenti litologie (Figura 5.3).

**Figura 5.3 - Carta geologica della piana di Licata (Grasso et al., 1998)**



- a) Le sabbie eoliche e le dune recenti (sd) che si sviluppano principalmente ad est del porto di Licata, lungo la spiaggia, e al settore occidentale nella contrada Mollaga e Pisciotto. Si tratta di territori agricoli seminativi con colture protette con serre e tunnel (Carta dell'uso del suolo del territorio del Comune di Licata, 2002). Il coefficiente della permeabilità è dell'ordine di  $10^{-2}$  cm/s.
- b) La litologia che affiora maggiormente è rappresentata dai *depositi alluvionali recenti* ed attuali (*a*) costituiti prevalentemente da lenti limose, sabbiose e talvolta ghiaiose. Si tratta di terreni agricoli, seminativi, irrigui con colture orticole prevalenti con tunnel. Il coefficiente di permeabilità dei terreni può variare dai  $10^{-3}$  e  $10^{-2}$  cm/s, dove prevale la frazione sabbiosa, ai  $10^{-4}$  e  $10^{-3}$  cm/s nelle aree con prevalenza di sedimenti a granulo-lometria più fine.
- c) I *depositi alluvionali terrazzati* (*t*) che affiorano principalmente nella Contrada Calandino e nel settore settentrionale della contrada Comune, costituiti da ciottoli ben arrotondati con una distribuzione caotica in una matrice di sabbie fini. Il coefficiente di permeabilità di tale formazione può variare tra i  $10^{-2}$  e  $10^{-3}$  cm/s. Simile permeabilità presentano anche i *depositi marini terrazzati* (*T*).
- d) Bassi valori del coefficiente di permeabilità dell'ordine di  $10^{-6}$  cm/s presentano i *depositi argillosi siltosi* (*Qa*) e le *argille marnose* grigio-azzurre (Pm).

Nel sottosuolo della piana di Licata e fino alla profondità di 10 m dal piano campagna si sviluppa un corpo acquifero costituito da lenti sabbiose o limo-sabbiose talvolta ghiaiose che però si trovano in comunicazione idraulica tra di loro (Figura 5.4).

**Figura 5.4 - Depositi fluviali lungo una sezione**



Si tratta chiaramente di un sistema multi-acquifero che presenta una geometria variabile che dipende fortemente dall'evoluzione geomorfologica che ha interessato il territorio negli ultimi millenni e dai fenomeni di sovralluvionamento del fiume Salso. Tale acquifero a falda libera e localmente semiconfinato, fortemente eterogeneo sia a scala orizzontale sia verticale, viene sfruttato in tutto il territorio di Licata dai pozzi a grande diametro. Si tratta di pozzi in pietra, i più vecchi, fino a quelli più recenti realizzati con anelli di cemento. In ogni caso, il diametro dei pozzi varia tra i 4 e 6 m, mentre la loro profondità dai 3 ai 8 m (Figura 5.5).

Tali pozzi hanno una doppia funzione; da una parte lo sfruttamento degli acquiferi per uso irriguo e dall'altra la 'raccolta' dell'acqua piovana nei periodi estivi, diminuendo gli effetti di evaporazione. Attualmente, gran parte di questi pozzi si trova dentro le serre, ampiamente diffuse in tutto il territorio.

In alcuni casi, a causa della scarsa piovosità, gli agricoltori hanno costruito un sistema di raccolta (grondaie) delle acque piovane sui tetti delle serre che viene successivamente immagazzinata in serbatoi chiusi per evitare i processi di evaporazione nei mesi primaverili-estivi (Figura 5.5).

Nel mese di luglio, il livello piezometrico nell'acquifero diminuisce drasticamente mentre, gran parte dei pozzi 'si seccano'. Davanti a questa situazione idrica gli agricoltori devono sospendere le coltivazioni.

Per la determinazione delle caratteristiche qualitative delle risorse idriche sotterranee, nel periodo maggio-giugno 2004, è stato effettuato inizialmente un censimento dei pozzi esistenti, reso spesso difficoltoso dall'ubicazione dei pozzi all'interno delle serre, ed in conseguenza non visibili ed accessibili.

In ogni singolo pozzo identificato in campagna, sono stati misurati il diametro del pozzo, la soggiacenza, i principali parametri chimico-fisici delle acque, quali pH, conducibilità elettrica e temperatura e, inoltre, sono stati prelevati campioni d'acqua in bottiglie in PVC.

**Figura 5.5 - Pozzo a grande diametro e sistema di raccolta delle acque piovane**



**Figura 5.6 - Lo stato qualitativo di un pozzo a grande diametro**



Successivamente sono state determinate le concentrazioni ioniche in Ca, Mg, SO<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub> e Cl utilizzando metodi spettrofotometrici, il HCO<sub>3</sub> con metodi colorimetrici, il K e Na con l'assorbimento atomico e il contenuto in alcuni metalli pesanti utilizzando il plasma massa.

Nelle pagine successive verranno presentati brevemente i risultati delle analisi chimiche effettuate nelle acque campionate nei pozzi. I risultati ottenuti sinora sono esposti in forma di diagrammi di tipo *scatter plot*.

In particolare, la conducibilità elettrica delle acque (riferita a tutti i campioni) presenta variazioni tra i 500 e i 15.000 microS/cm con valore medio pari a 5925 microS/cm (Figura 5.7). A tali valori elevati di conducibilità ha indubbiamente contribuito anche la modalità di gestione dei singoli pozzi. Infatti, dentro alcuni pozzi erano evidenti i resti delle bottiglie di fitofarmaci e concimi che vengono utilizzati nelle coltivazioni, oppure materiale vario non utilizzabile (Figura 5.6).

Simile andamento con quello della conducibilità elettrica presentano i solfati con variazioni tra 60 e 3.000 mg/l con un valore medio di 1428 mg/l (Figura 5.8).

I nitrati presentano variazioni tra i 10 e i 900 mg/l con valore medio pari a 120 mg/l (Figura 5.9). Valori in nitrati che superano i 200 mg/l sono da attribuire al forte inquinamento delle acque sotterranee da parte dei concimi minerali utilizzati in agricoltura. In alcuni casi, però, dobbiamo tenere conto che l'acqua della pulitura della strumentazione, utilizzata per la concimazione, viene ributtata nel pozzo. Per questo motivo, un campionamento delle acque poco dopo un tale evento potrebbe permettere di 'identificare' una sorgente di inquinamento discontinua e puntuale.

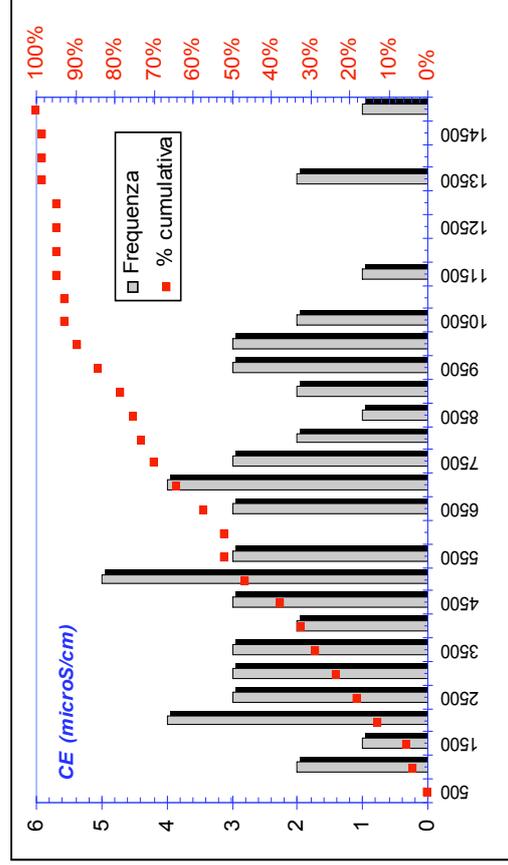
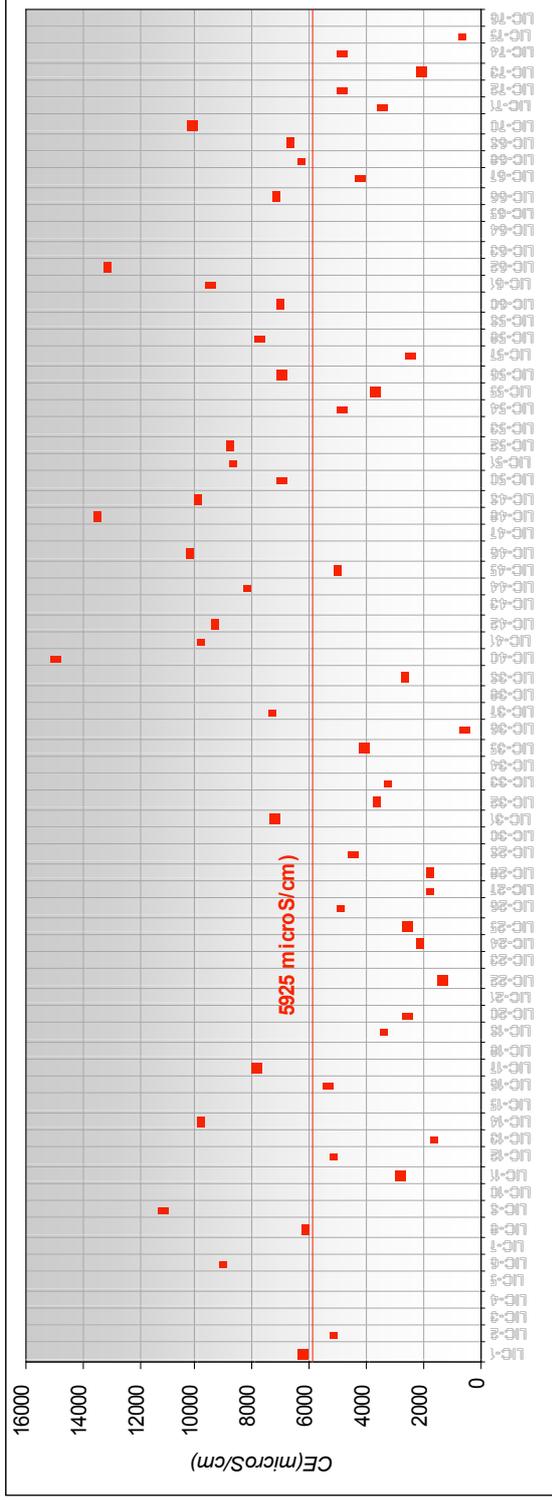
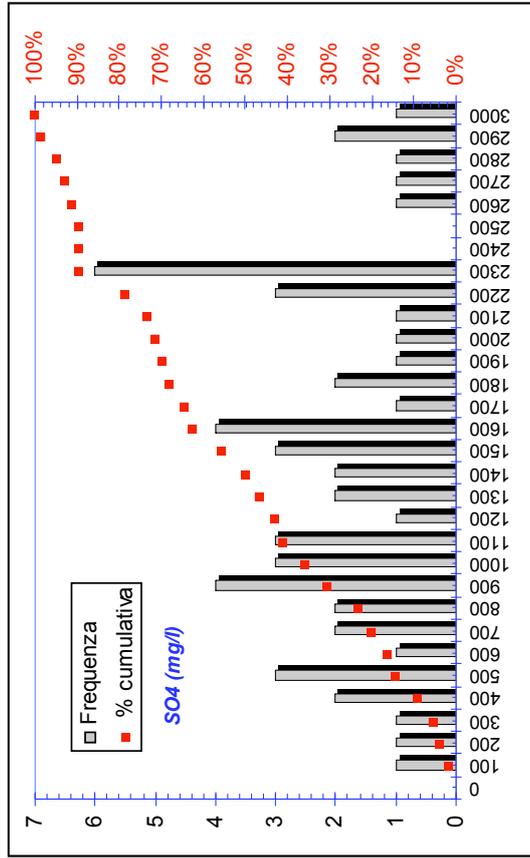
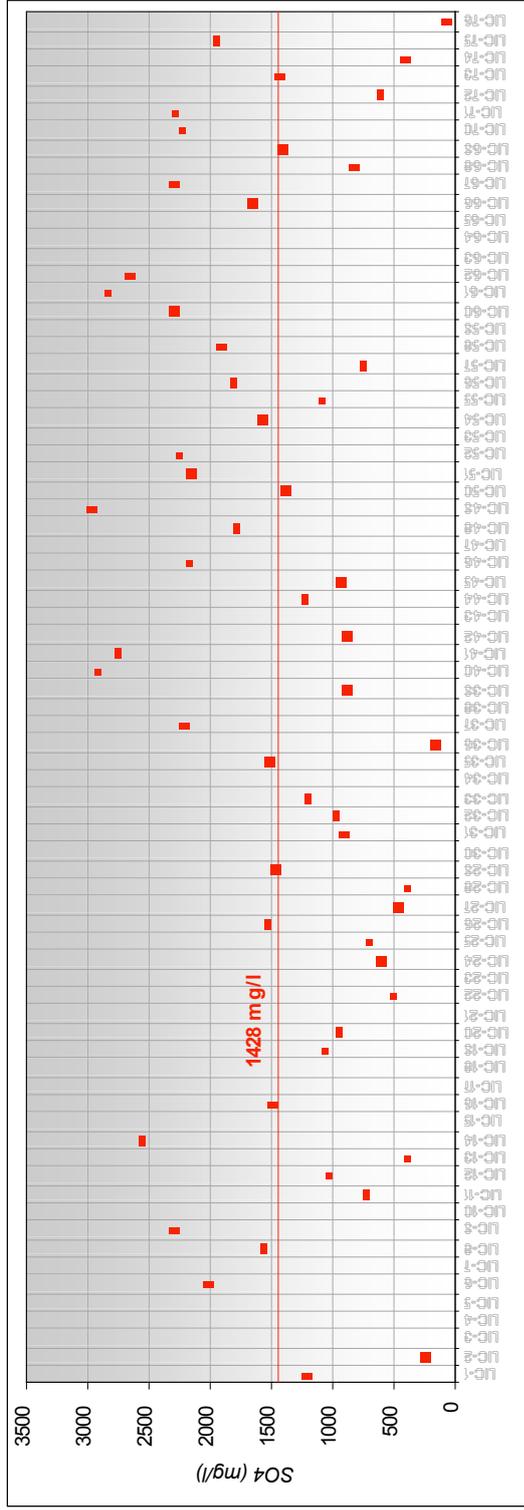
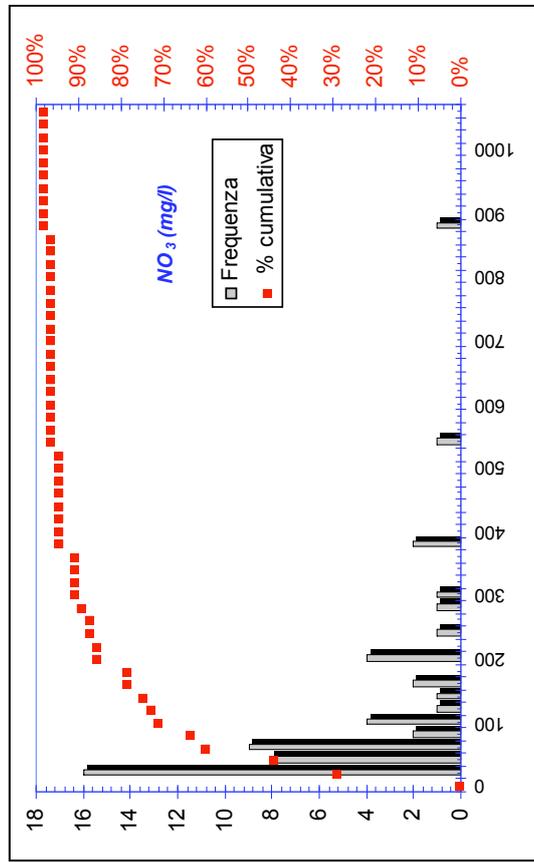
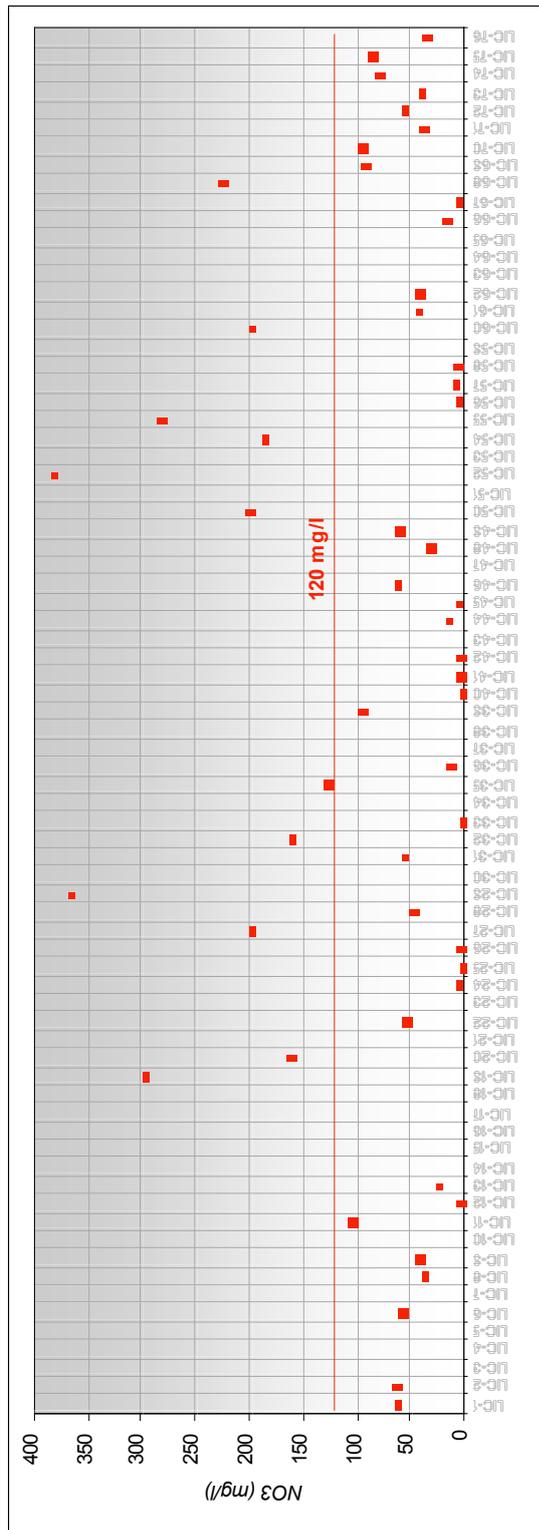


Figura 5.7 - Conduttività elettrica dei pozzi a falda libera (in microS/cm) e diagramma della frequenza e % cumulativa di tale parametro



**Figura 5.8 - Concentrazione ionica dei solfati (in mg/l) nei pozzi a falda libera e diagramma della frequenza e % cumulativa di tale parametro**



**Figura 5.9 - Concentrazione ionica dei nitrati (in mg/l) nei pozzi a falda libera e diagramma della frequenza e % cumulativa di tale parametro**

Elevate concentrazioni sono state riscontrate, in diversi pozzi, per alcuni elementi in traccia, come per esempio il boro che raggiunge i 450 microg/l e l'arsenico con valori di 40-50 microg/l. Valori di Sr che superano i 2000 microg/l, di Rb (250 microg/l), di Li (250 microg/l), di Se (200 microg/l) e di Fe (400 microg/l) sono stati determinati in diversi pozzi. Inoltre, come si può osservare dai grafici relativi alle concentrazioni ioniche valori di minore entità sono stati riscontrati per quanto riguarda il Mo, Cd, Ni, Cr, Cu, Co, Ba, U, Hg, V, Mn e Pb.

### **5.3 Elaborazione dei dati idrogeochimici dell'acquifero in falda libera**

La piana di Licata rappresenta una delle zone fertili della Sicilia centro-meridionale, caratterizzata dalla presenza di numerosissime serre. Le condizioni climatiche favorevoli hanno incentivato lo sviluppo di serre, all'interno delle quali si ha un'intensa attività agricola che costituisce una delle maggiori risorse economiche del territorio. Tali attività agricole risentono dei problemi di carenza qualitativa e quantitativa delle risorse idriche. Nei periodi estivi la bassa disponibilità d'acqua dagli acquiferi viene compensata da prelievi dal fiume Salso, il che comporta l'uso di acque ad elevata salinità che nel tempo stanno producendo il degrado dei suoli per salinizzazione e quindi accelerando i processi di desertificazione. Data la concomitanza di fattori climatici e fattori antropici responsabili del degrado delle georisorse, si è scelta la piana di Licata per lo studio dei processi di desertificazione.

Sono state eseguite tre campagne di rilevamento, la prima finalizzata al censimento dei pozzi e alla selezione dei pozzi rappresentativi dell'acquifero in falda libera. La seconda e la terza campagna sono state eseguite per la verifica delle variazioni stagionali dei parametri chimico-fisici e nel contempo hanno permesso la caratterizzazione chimica e chimico-fisica degli acquiferi. I dati di campagna, grazie all'utilizzo dei programmi surfer (v.7) e Corel Draw (v.10), sono stati elaborati e con essi sono state prodotte delle carte tematiche utili ai fini della descrizione della dinamica dei processi di degrado (Figure 5.10 e 5.11).

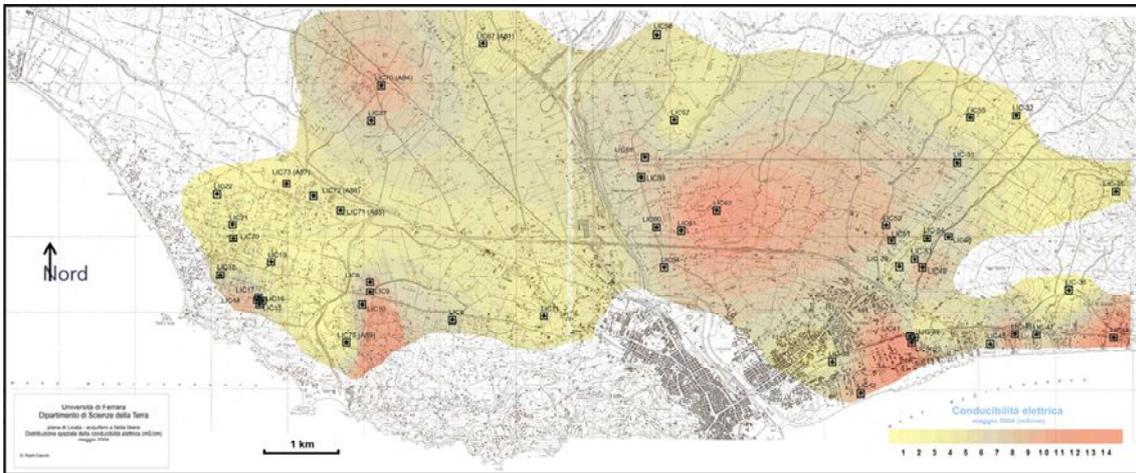
Da tali carte si evincono le problematiche di salinizzazione delle risorse idriche ed in particolare le criticità del territorio, che si mantengono anche in condizioni climatiche non siccitose.

Particolarmente critica risulta la fascia costiera bassa in cui il limite fra pianura alluvionale e mare è delineato da un sistema di dune di elevato pregio.

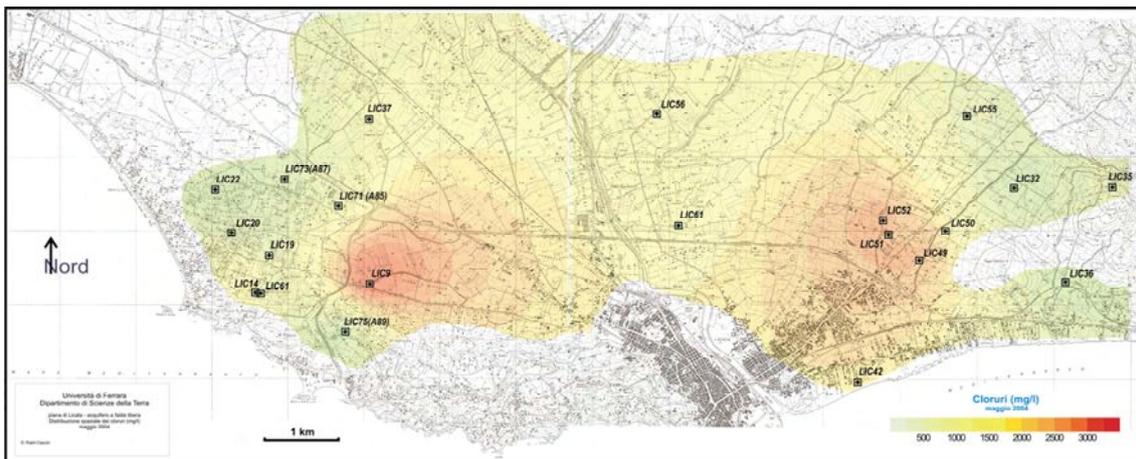
In tale aree la concomitante azione di più fattori ha creato le condizioni di fragilità che hanno consentito processi più o meno spinti di salinizzazione degli acquiferi. Emerge infatti l'importante funzione di barriera idraulica che le dune svolgono a protezione della retrostante area agricola. Interessante è stato constatare che contributi alla salinizzazione da parte del fiume Imera sono molto localizzati e riguardano essenzialmente solo la zona della foce.

**Figura 5.10 - Piana di Licata, campagna 2004, spazializzazione dei dati di conducibilità, cloruri e sodio**

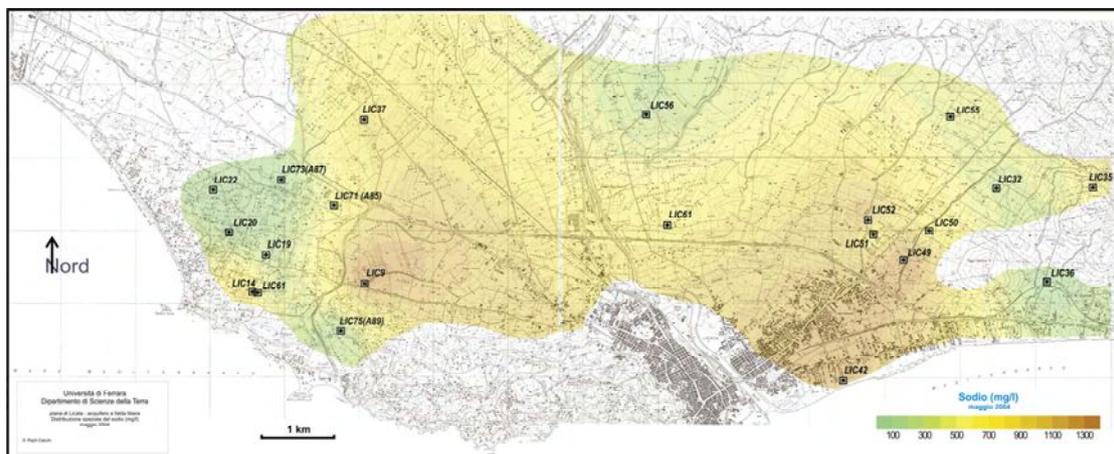
Conducibilità



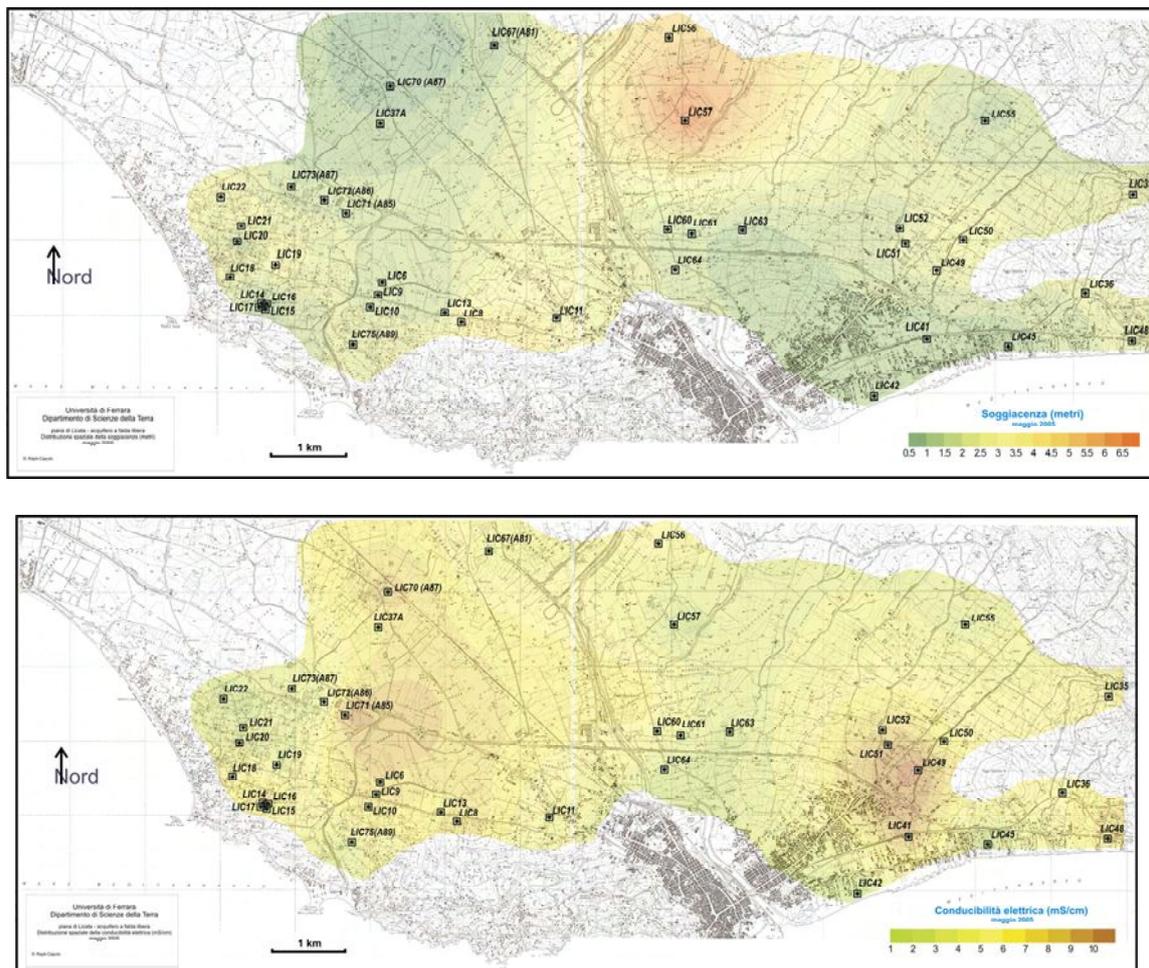
Cloruri



Sodio



**Figura 5.11 - Piana di Licata campagna 2005, spazializzazione dei dati di soggiacenza e conducibilità**



### 5.3.1 Relazione fra acquiferi e litologia

Le caratteristiche idrogeochimiche delle acque sotterranee riflettono sia la tessitura sia la natura petrografia delle rocce. Esiste inoltre una correlazione tra il chimismo delle acque e la densità e distribuzione delle serre a conferma del forte controllo che la disponibilità idrica ha sulla economia agricola. I terreni agricoli, seminativi, irrigui con colture orticole prevalenti con tunnel sono per lo più localizzati in aree dove affiorano *depositi alluvionali recenti* ed attuali (*a*) costituiti prevalentemente da lenti limose, sabbiose e talvolta ghiaiose. Il coefficiente di permeabilità dei terreni può variare dai  $10^{-3}$  e  $10^{-2}$  cm/s, dove prevale la frazione sabbiosa, ai  $10^{-4}$  e  $10^{-3}$  cm/s nelle aree con prevalenza di sedimenti a granulometria più fine. Maggiore permeabilità (tra i  $10^{-2}$  e  $10^{-3}$  cm/s) caratterizza i *depositi alluvionali terrazzati* (*t*) che affiorano principalmente nella Contrada Calandino e nel settore settentrionale della Contrada Comune, costituiti da ciottoli ben arrotondati con una distribuzione caotica in una matrice di sabbie fini. Nelle aree in cui i sedimenti hanno maggiore permeabilità si riscontrano anche le migliori caratteristiche chimico-fisiche delle acque ad eccezione di pochi pozzi in cui le alterazioni possono essere dovute a inquinamento.

Va sottolineato che la maggiore permeabilità corrisponde anche ad una maggiore vulnerabilità dell'acquifero. Nelle aree a bassi valori del coefficiente di permeabilità dell'ordine di  $10^{-6}$  cm/s presentano i *depositi argillosi siltosi (Qa)* e le *argille marnose grigio-azzurre (Pm)* prevale il seminativo, in esse i pozzi sono più sporadici e le caratteristiche chimico-fisiche peggiori.

La raccolta di dati litostratigrafici ha permesso la realizzazione di un profilo che permette di definire il modello idrogeologico del sottosuolo (allegato sezione Licata) che conferma la presenza nel sottosuolo della piana di Licata di un corpo acquifero costituito da lenti sabbiose o limo-sabbiose in comunicazione idraulica tra di loro.

La litologia che ospita l'acquifero a falda libera ha spessori variabili da 10 m fino a 30 metri dal piano campagna, e gli spessori maggiori sono riscontrabili in prossimità dell'alveo del Salso e dei paleoalvei da esso derivati. Il corpo acquifero poggia su un sottile livello argilloso eteropico con argille marnose che lo isolano idraulicamente dal sottostante livello di ghiaie dello spessore variabile da 0 a 10 metri. Le ghiaie sono rocce ad elevata permeabilità per cui rivestono notevole interesse ai fini di eventuali interventi di ricarica. Dalla sezione si deduce che anche questo livello poggia su sedimenti argilloso-marnosi.

Emerge quindi un carattere dell'acquifero a falda libera localmente semiconfinata, fortemente eterogenea sia a scala orizzontale sia verticale. L'analisi ha riguardato proprio questo corpo acquifero che viene sfruttato in tutto il territorio di Licata dai pozzi a grande diametro. Si tratta di pozzi in pietra, i più vecchi, fino a quelli più recenti realizzati con anelli di cemento. In ogni caso, il diametro dei pozzi varia tra i 4 e 6 m, mentre la loro profondità dai 3 ai 8 m (Figure 5.2-5.5).

Tali pozzi hanno una doppia funzione; da una parte lo sfruttamento degli acquiferi per uso irriguo e dall'altra la 'raccolta' dell'acqua piovana nei periodi estivi, diminuendo gli effetti di evaporazione. Attualmente, gran parte di questi pozzi si trova dentro le serre, ampiamente diffuse in tutto il territorio. In alcuni casi, a causa della scarsa piovosità, gli agricoltori hanno costruito un sistema di raccolta (grondaie) delle acque piovane sui tetti delle serre che viene successivamente immagazzinata in serbatoi chiusi per evitare i processi di evaporazione nei mesi primaverili-estivi.

#### **5.4 Tendenza evolutiva della linea di costa**

Lo studio delle caratteristiche idrogeochimiche dell'acquifero superficiale ha evidenziato la presenza di fenomeni di salinizzazione delle acque per intrusione di acque salate dal mare. Tali processi sono favoriti dalla regressione della linea di costa per cui è stata eseguita l'analisi dell'evoluzione della fascia costiera.

Il tratto della costa su cui insiste la piana di Licata, negli ultimi secoli, ha avuto una forte regressione, principalmente condizionata dagli apporti solidi e dall'evoluzione idrografica del fiume Salso e, secondariamente, dagli interventi antropici.

Informazioni cartografiche e l'osservazione delle foto aeree permettono di ricostruire l'evoluzione della linea di costa dal 1935 ad oggi, nelle sue fasi evolutive:

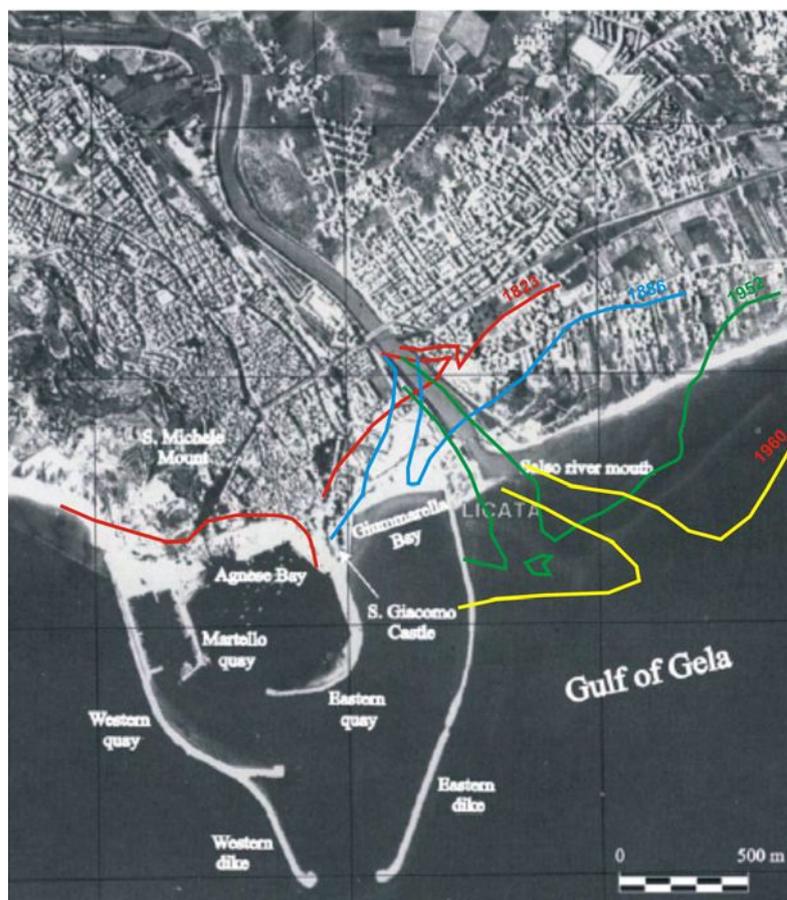
- nel settore occidentale, Serra Mollarella, un affioramento calcareo che si sviluppa a mare parallelamente alla linea di costa, ha favorito e protetto due spiagge che durante il periodo 1968-1994 hanno registrato un avanzamento, negli anni successivi sono state interessate da processi di erosione di bassa intensità;

- la fascia costiera che si estende dal Porto di Licata fino alla foce del Torrente Cantigaglione è caratterizzata da un litorale 'dolce' sabbioso. In tale tratto, gli interventi antropici presso l'abitato di Licata, come la realizzazione del porto della città e degli interventi eseguiti lungo l'asta fluviale del fiume Imera Meridionale alla scala del bacino, hanno determinato profonde modifiche del litorale. Dal 1935-1968 questo tratto del litorale ha avuto fenomeni di avanzamento della linea di costa, particolarmente evidenti alla foce del fiume Salso, con locali avanzamenti fino a 300 metri. Negli anni dopo l'ampliamento del porto di Licata si è realizzato un arretramento di circa 400 m nella zona intorno alla foce, accompagnato da un generale arretramento di circa 30 m su tutto il resto di litorale. Tale variazione del sistema costiero può essere attribuito:

- i) ampliamento del porto che modificando le correnti ha favorito il trasporto a largo dei detriti;
- ii) costruzione nel bacino dell'Imera Meridionale di invasi per uso irriguo o idropotabile che trattengono parte del trasporto solido (dighe di Villarosa in funzione al nel 1972 e di Olivo e Gibbesi in funzione dalla fine degli anni ottanta);
- iii) interventi di bonifica lungo il corso d'acqua e la costruzione di numerosissimi imbrigliamenti lungo i torrenti-affluenti del Salso;
- iv) prelievo di materiali inerti lungo l'alveo;
- v) espansione demografica nelle aree di spiaggia, che livellando le dune producono una modificazione del profilo che innescano fenomeni erosivi.

Le ricostruzioni di Amore et al. (2002), che basandosi sull'elaborazione delle informazioni provenienti dalle carte topografiche e da dati storici, e su misure dirette, hanno ricostruito l'evoluzione della linea di costa, in prossimità della foce del Salso, dal 200 A.C. ad oggi, sono state riportate su una foto aerea, in modo da rendere immediatamente evidenti le variazioni registrate nel tempo nella fascia costiera (Figura 5.12).

**Figura 5.12 - Evoluzione della foce del fiume Salso dal 1823 ad oggi (ridisegnato da Amore et al. (2002); la linea a colori rappresenta la posizione della costa in diversi periodi)**



## 5.5 Discussione e potenziali azioni per contrastare i fenomeni

L'elaborazione dei dati chimico-fisici permette di evidenziare un basso contributo ai processi di degrado degli acquiferi da parte del fiume Imera, il quale svolge una funzione alimentante lungo quasi tutto l'alveo, ad eccezione della foce. Dall'elaborazione si deduce che la presenza di acque dolci nell'acquifero è in grado di produrre una barriera idraulica sufficiente a contrastare flussi di acqua salata dal fiume, questa capacità sembra comunque venir meno nel tratto terminale del fiume dove si ha un importante ingresso di acqua salata che va a deteriorare gli acquiferi che si sviluppano lungo l'alveo sinistro del fiume Salso.

Tale zona è la più vulnerabile a fenomeni di ingressione del cuneo salino in quanto le dune sono estremamente permeabili, inoltre essendo il cuneo salino influenzato dal livello piezometrico della falda libera anche una lieve depressione della morfologia, prodotta dagli interventi di urbanizzazione, e quindi livellamento delle quote, induce un abbassamento del livello piezometrico e quindi un avanzamento del cuneo salino.

Negli ultimi anni inoltre si è registrata un forte arretramento della costa che ha favorito l'ingressione di acque salate.

Si ricorda che la fascia costiera che si estende dal Porto di Licata fino alla foce del Torrente Cantigaglione è caratterizzata da un litorale 'dolce' sabbioso. In tale tratto, gli interventi antropici presso l'abitato di Licata, come la realizzazione del porto della città e degli interventi eseguiti lungo l'asta fluviale del fiume Imera Meridionale alla scala del bacino, hanno determinato profonde modifiche del litorale.

Da questo lavoro emerge che la salvaguardia delle risorse idriche nella fascia costiera passa attraverso un'azione integrata che metta in atto strategie utili a ripristinare l'equilibrio erosivo lungo la fascia costiera.

L'attività di rilevamento dei pozzi, presenti nella pianura alluvionale del territorio di Licata, integrata con l'analisi delle geometrie dell'acquifero, attraverso la raccolta ed elaborazione di dati stratigrafici, ha permesso la produzione del modello litostratigrafico concettuale del territorio nella fascia costiera (sezione LICATA-e ESE-NNO).

Il profilo, che si estende fino ad una profondità di 60 metri dal piano campagna evidenzia la forte eterogeneità delle litologie che costituiscono l'acquifero in falda libera che sono interessate da passaggi laterali da terreni di media permeabilità a sedimenti a bassa permeabilità. L'individuazione delle aree più permeabili è interessante non solo ai fini della valorizzazione delle risorse ma anche per la definizione di piani di tutela in quanto rappresentano le aree più vulnerabili.

Si constata inoltre che nei primi 20 metri dal piano campagna, le forti variazioni della permeabilità fanno sì che la ricarica dell'acquifero nelle aree distanti dai corpi idrici superficiali è favorita da apporti per irrigazione, oltre all'infiltrazione efficace, mentre nelle aree limitrofe al fiume Salso, e nel sistema di dune costiere, si hanno consistenti apporti dai corpi idrici superficiali, e quindi sono soggette a degrado per intrusione salina. Fortunatamente i passaggi eteropici con sedimenti a bassa permeabilità limita a strette fasce le aree interessate da questo processo di degrado. È stato inoltre constatato che le aree a minore permeabilità presentano anche acque di minore qualità, infatti le analisi chimiche, eseguite nella precedente campagna, mostrano come la scarsità di acqua sia accompagnata da elevata salinità.

Dal profilo (e/o modello lito-stratigrafico del sottosuolo) emerge inoltre che nell'area indagata i depositi alluvionali recenti poggiano, a circa 20 metri dal piano campagna, su terreni argillosi siltosi e sulle argille marnose grigio-azzurre a bassi valori del coefficiente di permeabilità dell'ordine di  $10^{-6}$  cm/s, sedimenti che, ad una profondità di circa 25 metri dal piano campagna, presentano un'intercalazione di ghiaie che costituiscono un acquifero semiconfinato di elevata permeabilità ( $10^{-2}$  e  $10^{-3}$  cm/s). Le ghiaie sono intercalate a sedimenti per cui sono idraulicamente protette da inquinamento antropico.

Ai fini della tutela degli acquiferi occorre anche intervenire a livello urbanistico ponendo dei vincoli nella fascia costiera che impongano il rispetto delle morfologie delle dune, questa azione oltre a proteggere gli acquiferi avrebbe effetti favorevoli anche sulla regolamentazione dell'erosione costiera. Un ulteriore intervento potrebbe riguardare la parte terminale dell'Imera in cui si potrebbero sviluppare progetti utili a contrastare l'ingressione salina.

## **6. MONITORAGGIO “ON-LINE” DELLA QUALITÀ DELLE ACQUE DEL FIUME IMERA**

Paolo Capocecera, Antonio Poletti, Sandro Murgia, Roberta Selvaggi

### **6.1 Elementi sull'idrometria del fiume Imera**

Il bacino del Fiume Imera Meridionale si estende da Nord a Sud nella zona centrale della Sicilia, interessando una delle zone più aride della Regione e attraversando l'area dove un tempo erano presenti alcune tra le più importanti miniere di salgemma dell'isola.

Dato l'elevato tenore di salinità delle acque, il loro impiego a fini irrigui ha sempre costituito un problema di notevole rilevanza dal punto di vista economico e ambientale.

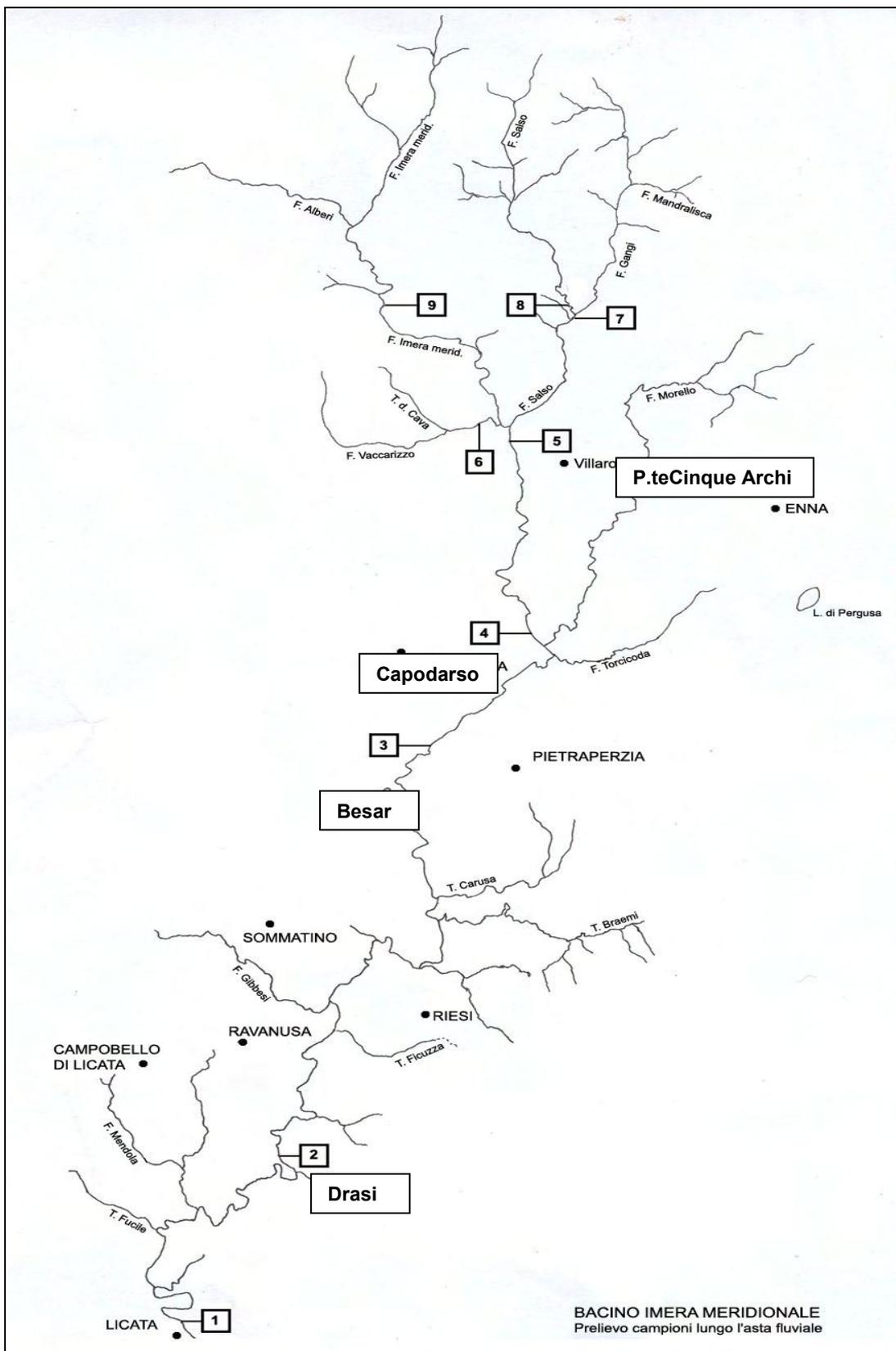
Una esauriente ricerca sulle cause della salinità delle acque è stata effettuata nel 1970 da Roda i cui risultati sono stati pubblicati nell'articolo "Origine della salinità delle acque del Fiume Salso o Imera (*Boll. Acc. Gioenia Sc. Nat.*, 10, 471-530).

Tale lavoro costituisce una preziosa base conoscitiva per lo sviluppo delle attività di monitoraggio in quanto, oltre a fornire un inquadramento geologico e idrologico dell'area, riporta, tra l'altro, i risultati di uno studio quantitativo sui carichi di salgemma trasportati dal fiume correlabili al regime idrico delle acque. Nell'ambito delle attività di studio delle principali caratteristiche del bacino si è voluto, a distanza di trenta anni, produrre un nuovo set di dati sulle caratteristiche delle acque alla luce anche dei profondi cambiamenti intervenuti con la progressiva chiusura delle miniere.

Dalla ricostruzione del reticolo idrografico sono stati identificati i nodi del bacino ed i diversi sottobacini (Figura 6.1):

- Imera Superiore, con livello di base coincidente con il punto di confluenza del fiume Salso Superiore in località P.te Cinque Archi (Punto 5);
- Salso Superiore, con livello di base in corrispondenza della confluenza con l'Imera Superiore (Punto 5);
- Imera Meridionale, tratto foce del fiume Morello fino al Ponte di Besaro (Punto 3);
- Imera Meridionale, tratto Ponte di Besaro-foce torrente Braemi;
- Torrente Braemi, con livello di base in corrispondenza della confluenza con il F. Imera Meridionale;
- Imera Meridionale: tratto foce torrente Brami- Località Drasi (Punto 2);
- Imera Meridionale: tratto Località Drasi - foce (Punto 1, Licata).

Figura 6.1 - Bacino dell'Imera e punti di campionamento



**Tabella 6.1 – Le stazioni idrometriche sul fiume Imera**

	Stazioni Idrometriche	Quota dello zero idrometrico s.l.m.	kmq (bacino di dominio)	Note
1	Ponte Cinque Archi	340	545	Sul ponte omonimo della S.S. 121
2	Capodarso	270	611	Sul ponte omonimo della S.S. 122 tra Caltanissetta ed Enna
3	Besaro	230	995	Sul ponte omonimo della S.S. 191 tra Caltanissetta e Pietraperzia
4	Drasi	56	1782	In località Drasi, a 7 km a SSE di Ravanusa , zona Industriale.

Nella stessa Figura 6.1 sono indicate, con i nomi, le stazioni idrometriche per la misura della portata, gestite dal Servizio Tecnico Idrografico della Regione Sicilia, le cui caratteristiche principali sono riportate nella Tabella 6.1.

Le stazioni di Capodarso e Drasi sono installate in corrispondenza di restringimenti dell'alveo del fiume, a differenza delle altre stazioni in cui il letto fluviale risulta particolarmente ampio.

Per avere un'idea del regime idrico del Fiume Imera Meridionale vengono riportati nella Tabella 6.2 i dati caratteristici della stazione di Drasi.

I periodi di osservazione sono stati ricavati dagli Annali Idrologici del Servizio Tecnico Idrografico Regionale. Sono riportati i periodi dal 1960 fino al 1965 (utilizzati nel lavoro di Roda) e i periodi complessivi dal 1960 al 1990, 1993, 1995 e 1996.

Tali elementi sono la portata giornaliera in mc/s massima, media e minima (Q max, Q med, Q min), il contributo medio di afflusso meteorico (C med), i valori dell'altezza dell'afflusso meteorico (mm), l'altezza di deflusso (mm) e il coefficiente di deflusso.

**Tabella 6.2 - Dati degli annali idrologici**

Parametri	LOCALITÀ DRASI		
	1960-1965	1960-90; 1993; 1995	1996
Q max (mc/s)	257,00	1020,00	573,81
Q med (mc/s)	4,91	5,61	16,98
Q min (mc/s)	0,00	0,00	0,12
C med (l/s . kmq)	2,80	3,15	9,53
Afflusso meteorico (mm)	564,10	552,1	875,2
Altezza di deflusso (mm)	86,90	99,4	300,4
Coefficiente di deflusso	<b>0,16</b>	<b>0,18</b>	<b>0,34</b>

Si nota dalla tabella che la portata media è molto inferiore al valore massimo. Il valore minimo è addirittura zero. Il coefficiente di deflusso è estremamente basso mentre i valori mensili variano significativamente come riportato nella Tabella 6.3.

La limitata estensione dei terreni permeabili che interessano il bacino e il limitato deflusso sotterraneo dovuto alle sorgenti, presenti principalmente nelle falde meridionali delle Madonie (0,38 mc/s), fanno ritenere che non vi siano altri significativi apporti nel bilancio idrologico, con esclusione della falda subalvea che si presume essere presente lungo il corso del fiume Imera Meridionale per la presenza di estesi depositi alluvionali (Roda, 1970)

Tali considerazioni sembrano non giustificare il basso valore del coefficiente di deflusso che, anche nei mesi più piovosi, supera raramente 0,5. Questo aspetto fa ritenere che nel caso del bacino dell'Imera il coefficiente di deflusso venga fortemente influenzato dagli elevati valori della evaporazione. Nello studio di Roda l'evaporazione è stata stimata in 536 mm (evaporazione reale) e risulta essere l'80% del valore dell'altezza media dell'afflusso annuo dell'area del bacino, stimata dallo stesso autore in 670 mm. Il restante 20% costituisce pertanto il deflusso, valore in linea con quelli stimati per Drasi (ubicata a pochi chilometri dalla foce ) negli archi temporali 1960-1965, 1960-1995 (rispettivamente 0,16 e 0,18).

**Tabella 6.3 - Valori mensili dei coefficienti di deflusso**

Anni	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
1960-1965	0,18	0,29	0,19	0,16	0,12	0,06	0,13	0,04	0,04	0,04	0,05	0,12
1960-90; 1993; 1995	0,36	0,29	0,27	0,15	0,12	0,12	0,08	0,06	0,06	0,07	0,10	0,17
1996	0,52	0,63	0,69	0,20	0,07	0,06	0,10	0,03	0,02	0,09	0,12	0,31

## 6.2 Scelta del sito di indagine

È stata effettuata una ricognizione alle stazioni idrometriche riportate nella Tabella 6.1 per valutare la fattibilità di installare una sonda multiparametrica in grado di rilevare simultaneamente temperatura, conducibilità, salinità, pH, redox, ossigeno disciolto, livello e portata.

I criteri adottati per la scelta del sito sono stati essenzialmente:

- presenza di una infrastruttura del Servizio Idrografico della Regione Sicilia;
- possibilità di confrontare i dati idrometrici rilevati dal Servizio Idrografico con quelli rilevati dalla sonda;
- possibilità di confrontare i dati di salinità attuali con quelli rilevati nelle stazioni prese in considerazione nel lavoro di Roda;
- condizioni logistiche, di accessibilità e di messa in sicurezza delle attrezzature;
- consentire l'immersione in acqua della sonda anche in condizioni di magra;
- sufficiente copertura GSM per la trasmissione dei dati via telefono.

Dalla ricognizione è emerso che la stazione di Drasi, situata nel Comune di Riesi (a circa 15 km dalla foce) presenta le condizioni ottimali per l'installazione della sonda. Come è noto, la relazione tra la portata defluente e l'altezza idrometrica (denominata scala di deflusso) consente di stimare in continuo il valore della portata.

La scala di deflusso viene determinata sperimentalmente attraverso le misure di portata (effettuate con varie metodiche) e la contemporanea misura dell'altezza idrometrica.

La scala di deflusso varia nel tempo in quanto l'area della sezione si modifica significativamente in occasione di eventi di piena o a causa di fattori che inducono un cambiamento della morfologia dell'asta fluviale.

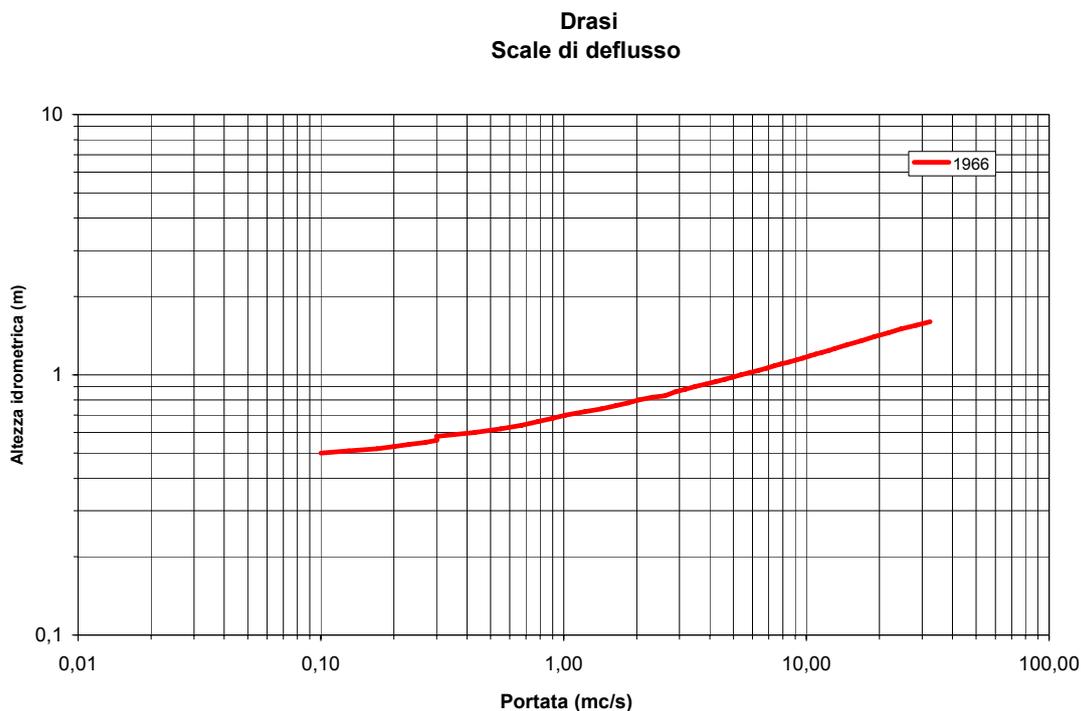
Per la stazione di Drasi sono state prese in esame le scale numeriche riportate negli Annali Idrologici del Servizio Idrografico relativamente all'anno 1966 e consistenti in coppie di valori relativi all'*altezza idrometrica-portata*.

I dati sono stati riportati in un grafico con scale degli assi bi-logaritmiche (Figura 6.2).

La scala di deflusso ricavata con i dati del 1966 riporta coppie di valori estese anche a modeste variazioni delle altezze idrometriche e portate che variano da 0,1 mc/s a 32,3 mc/s.

La pendenza della scala di deflusso per portate modeste è tale che con un incremento di un fattore 1,5 del livello idrometrico ci si aspetta un aumento di circa un fattore 10 delle portate.

**Figura 6.2 - Scala di deflusso, stazione di Drasi**



### 6.3 La salinità del fiume Imera

Le cause principali della salinità delle acque del fiume Imera Meridionale sono riconducibili alla presenza, lungo tutto il bacino, di estese formazioni evaporitiche con intercalazioni di salgemma e sali potassici. I fenomeni di dissoluzione di tali rocce a contatto con le acque sono pertanto l'origine delle elevate concentrazioni saline delle acque.

Nel lavoro di Roda vengono presi in considerazione gli anni che vanno dal 1955 al 1956 e dal 1959 al 1961. Durante tali periodi sono state effettuate diverse campagne di misura per determinare il contenuto dei solfati ( $\text{SO}_4^{--}$ ) e cloruri (come NaCl) presenti nelle acque del fiume. I prelievi furono eseguiti in corrispondenza delle già citate stazioni idrometriche.

Si tratta di misure sistematiche che avevano l'obiettivo di stimare il contributo del salgemma trasportato dal fiume, una volta note le concentrazioni medie e le portate medie delle acque.

Il prelievo dei campioni, effettuato non in maniera continuativa (uno o due campionamenti giornalieri) e la stima della portata affetta da imprecisioni, hanno condotto a risultati di larga massima ma estremamente preziosi per un confronto con quelli che sono in corso di elaborazione.

Per agevolare questo confronto sono stati considerati tutti i dati di concentrazione del salgemma (variabile da 0,96 ‰ a 5,82 ‰) e relativi alla stazione di Drasi. L'Autore trascura i solfati in quanto la loro concentrazione ha una variabilità minore nei mesi considerati (0,71- 2,84 ‰). I volumi d'acqua mensili sono espressi in metri cubi, mentre il peso del salgemma trasportato mensilmente (espresso in kg) è stato calcolato attraverso la sua concentrazione espressa in ‰. Tali valori sono stati riportati in forma tabellare, accorpendo in un'unica sequenza i periodi discontinui (Tabella 6.4).

Per mettere in evidenza l'andamento temporale dei parametri è stato elaborato il grafico di Figura 6.3 dove si evidenzia in modo netto che la salinità (riferita al solo NaCl) e il peso del salgemma trasportato, dipendono dalla portata.

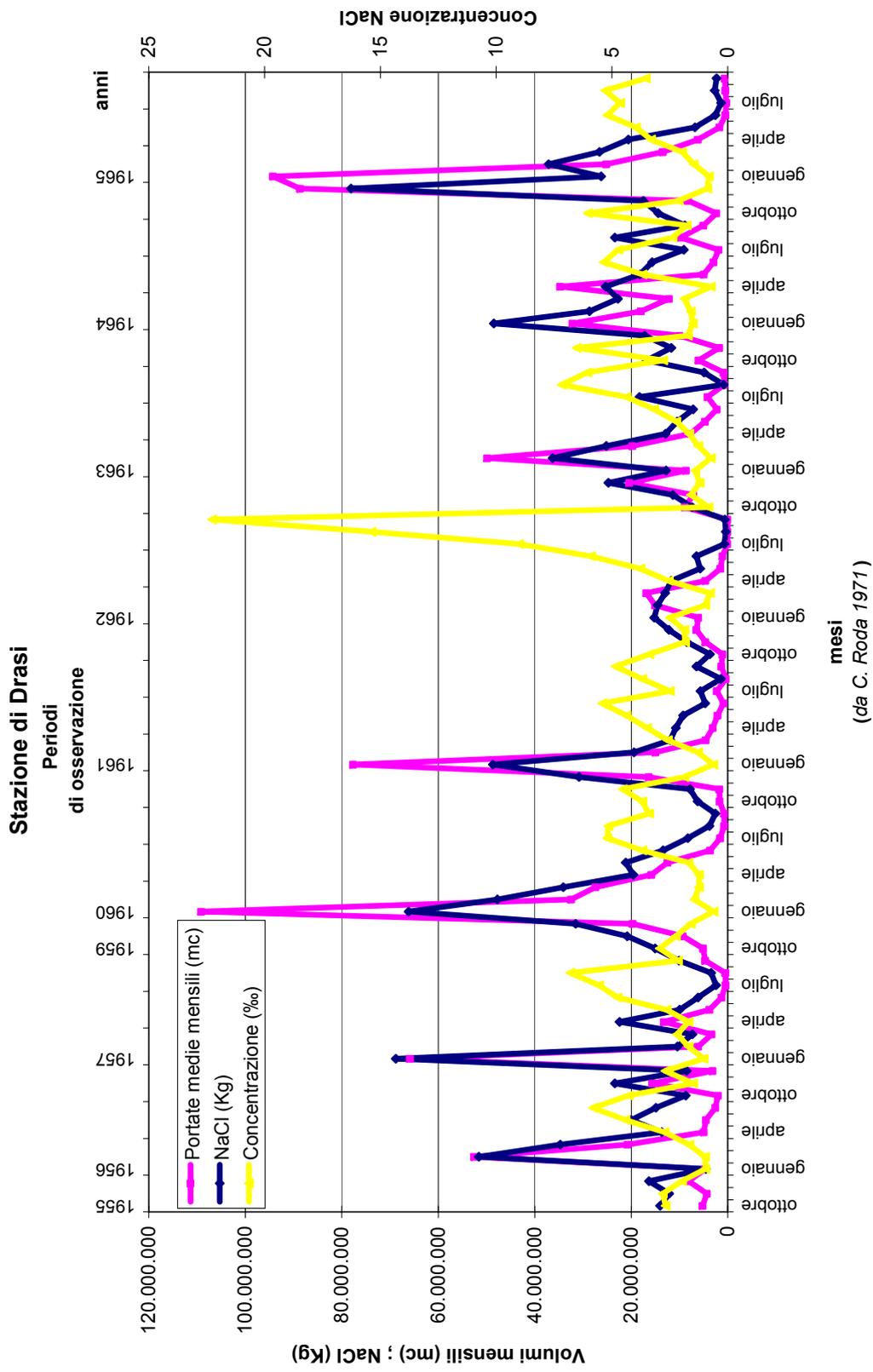
Le relazioni tra *concentrazione-portata* e *peso di salgemma-portata* non sono di tipo lineare come risulta dalle Figure 6.4 e 6.5 (diagramma bi-logarimico). Se la concentrazione dei sali fosse dipendente solo dalla diluizione ci si aspetterebbe una relazione lineare; la non linearità sembra quindi confermare l'influenza di fattori quali l'evaporazione, contributi di acque sorgive e fenomeni di solubilizzazione delle rocce evaporitiche in occasione di portate elevate.

**Tabella 6.4**

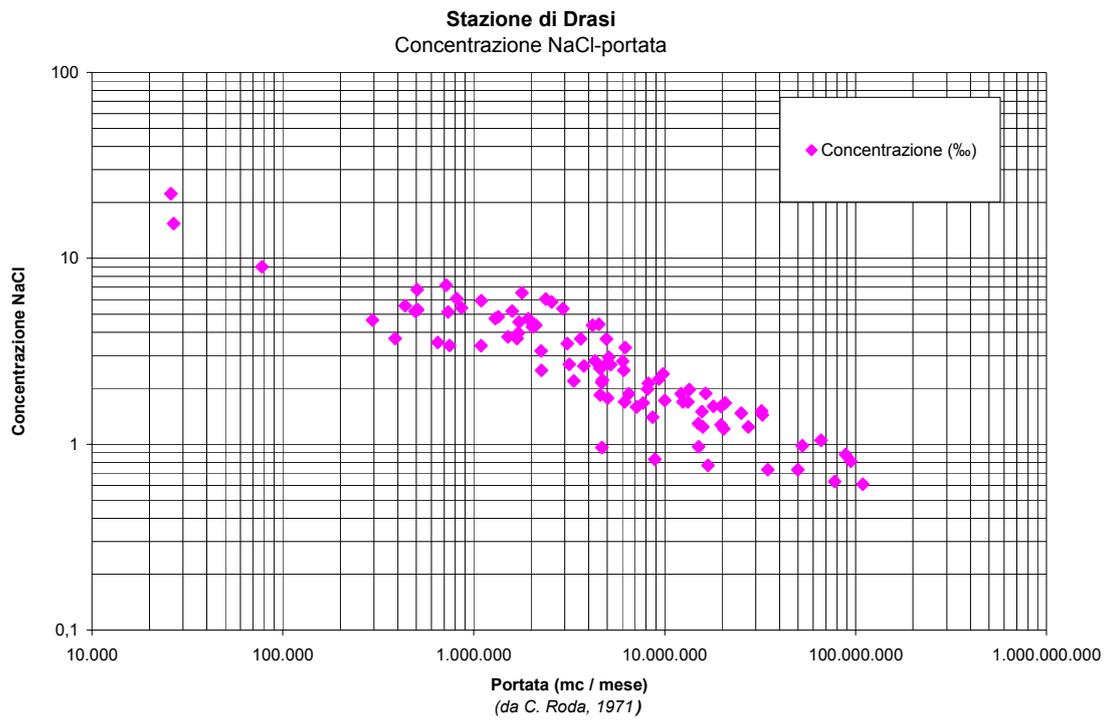
		Portate medie mensili (mc)	NaCl (Kg)	Concentrazione (‰)
1962	gennaio	6.104.160	15.253.394	2,50
	febbraio	15.054.336	14.559.851	0,97
	marzo	16.884.288	12.985.937	0,77
	aprile	4.599.072	11.713.524	2,55
	maggio	1.511.136	5.709.675	3,78
	giugno	1.093.824	6.469.347	5,91
	luglio	77.760	700.583	9,01
	agosto	26.784	412.068	15,38
	settembre	25.920	576.988	22,26
	ottobre	8.881.920	7.357.107	0,83
	novembre	7.125.408	11.359.077	1,59
	dicembre	20.402.496	24.730.868	1,21
1963	gennaio	8.636.544	12.807.317	1,40
	febbraio	49.864.032	36.303.103	0,73
	marzo	19.747.584	25.157.753	1,27
	aprile	7.709.472	12.905.870	1,67
	maggio	4.732.128	10.499.224	2,22
	giugno	2.253.312	7.174.492	3,18
	luglio	4.190.400	18.294.224	4,37
	agosto	717.120	841.303	7,17
	settembre	813.888	4.942.512	6,07
	ottobre	6.026.400	16.843.533	2,79
	novembre	1.788.480	11.680.511	6,53
	dicembre	10.017.216	17.228.471	1,72
1964	gennaio	32.140.800	48.505.427	1,51
	febbraio	18.015.264	28.656.063	1,60
	marzo	12.186.720	22.759.764	1,87
	aprile	34.732.800	25.303.994	0,73
	maggio	4.955.040	18.211.280	3,68
	giugno	2.928.960	15.686.093	5,36
	luglio	1.928.448	9.115.908	4,73
	agosto	9.802.944	23.396.861	2,39
	settembre	5.028.480	8.914.476	1,77
	ottobre	2.383.776	14.390.032	6,04
	novembre	8.216.640	17.503.301	2,13
	dicembre	88.655.040	78.090.791	0,88
1965	gennaio	94.279.680	26.265.937	0,81
	febbraio	25.159.680	37.110.018	1,47
	marzo	13.472.352	26.602.897	1,97
	aprile	6.220.800	20.611.896	3,31
	maggio	1.714.176	6.798.151	3,97
	giugno	492.480	2.561.820	5,20
	luglio	294.624	1.371.311	4,65
	agosto	508.896	2.690.548	5,30
	settembre	648.000	2.287.898	3,53

		Portate medie mensili (mc)	NaCl (Kg)	Concentrazione (‰)
1955	ottobre	5.213.376	14.014.307	2,68
	novembre	431.728	12.153.462	2,81
	dicembre	8.135.694	16.313.050	1,98
1956	gennaio	4.695.680	4.502.236	0,96
	febbraio	52.597.872	51.569.283	0,98
	marzo	20.767.968	34.723.505	1,67
	aprile	4.991.328	13.662.525	2,73
	maggio	4.524.768	20.008.669	4,42
	giugno	2.558.304	14.893.216	5,82
	ottobre	2.027.808	8.689.257	4,28
	novembre	15.653.232	23.417.018	1,5
	dicembre	3.163.968	8.507.955	2,69
1957	gennaio	65.829.024	68.814.274	1,05
	febbraio	6.166.368	10.426.450	1,69
	marzo	3.339.360	7.315.376	2,19
	aprile	13.233.888	22.418.113	1,69
	maggio	3.771.360	9.960.693	2,64
	giugno	1.297.728	6.170.308	4,75
	luglio	437.164	2.430.397	5,56
	agosto	505.440	3.434.201	6,79
	settembre	4.688.064	10.096.047	2,15
1959	ottobre	5.103.648	15.029.392	2,94
	novembre	9.313.920	20.848.329	2,24
	dicembre	19.732.896	31.512.076	1,60
1960	gennaio	109.119.744	66.151.495	0,61
	febbraio	32.479.488	47.750.513	1,44
	marzo	27.436.320	34.093.146	1,24
	aprile	15.834.528	19.588.306	1,24
	maggio	12.485.664	21.144.300	1,69
	giugno	3.636.576	13.425.826	3,69
	luglio	1.587.168	8.271.582	5,21
	agosto	733.536	3.777.952	5,15
	settembre	746.469	2.538.717	3,40
	ottobre	1.683.072	6.234.892	3,70
	novembre	1.727.136	7.841.353	4,54
	dicembre	16.397.856	30.860.007	1,88
1961	gennaio	77.657.184	48.712.139	0,63
	febbraio	15.010.272	19.417.268	1,29
	marzo	4.596.480	11.898.040	2,59
	aprile	3.092.256	10.746.069	3,48
	maggio	2.115.936	9.257.155	4,37
	giugno	862.272	4.670.775	5,42
	luglio	2.265.408	5.673.041	2,50
	agosto	387.072	1.430.637	3,70
	settembre	1.344.880	6.470.064	4,85
	ottobre	1.091.232	3.703.234	3,39
	novembre	4.599.936	8.457.290	1,84
	dicembre	6.496.416	12.178.659	1,87

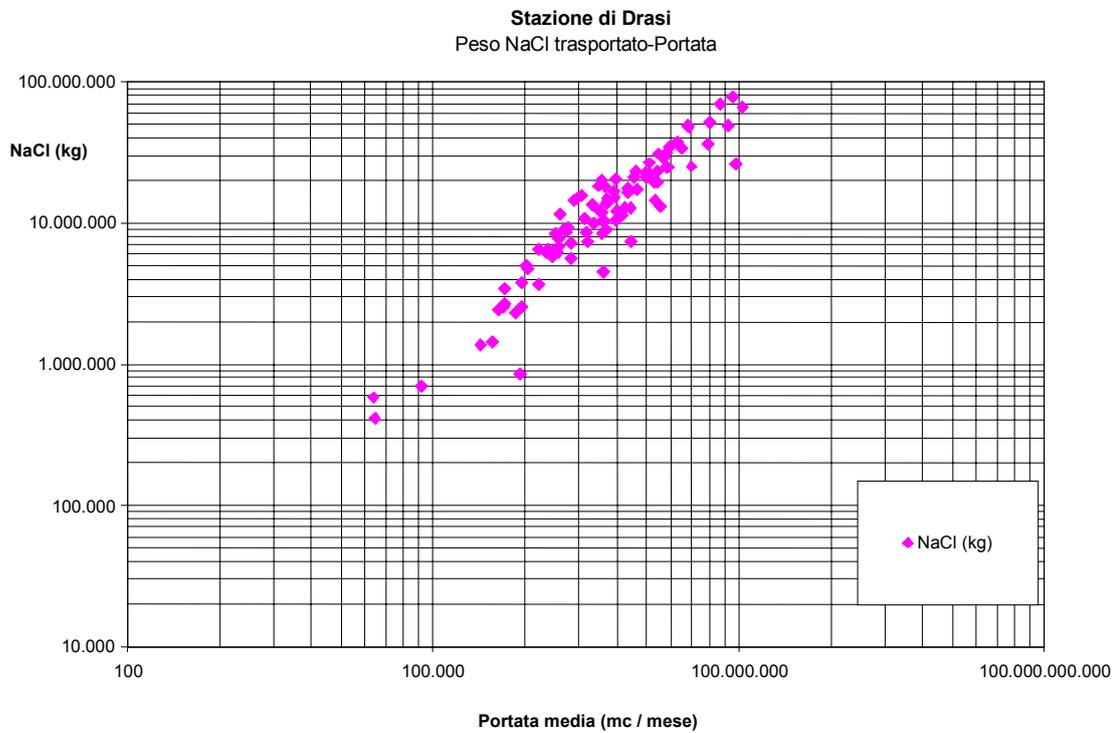
Figura 6.3 - Andamento della salinità espressa in NaCl e portate



**Figura 6.4**



**Figura 6.5**



### 6.3.1 Il monitoraggio in continuo

Nell'ambito del progetto RIADE, è stato scelto, come area di studio, il bacino dell'Imera Meridionale ove, secondo i criteri sopra menzionati al paragrafo 6.2, poter convenientemente collocare la sonda per la misurazione in continuo delle principali caratteristiche chimico fisiche delle acque.

La configurazione del sistema installato presso la postazione di Drasi, si compone di una centralina di acquisizione dati e dalla sonda multiparametrica Hydrolab - mod. Minisonde 4a immersa in alveo, a circa un metro dal pelo libero dell'acqua.

Un cavo sommerso e protetto da un tubo in PVC consente il collegamento della sonda alla centralina.



**Figura 6.6 - Interno della capannina con l'acquisitore dati**



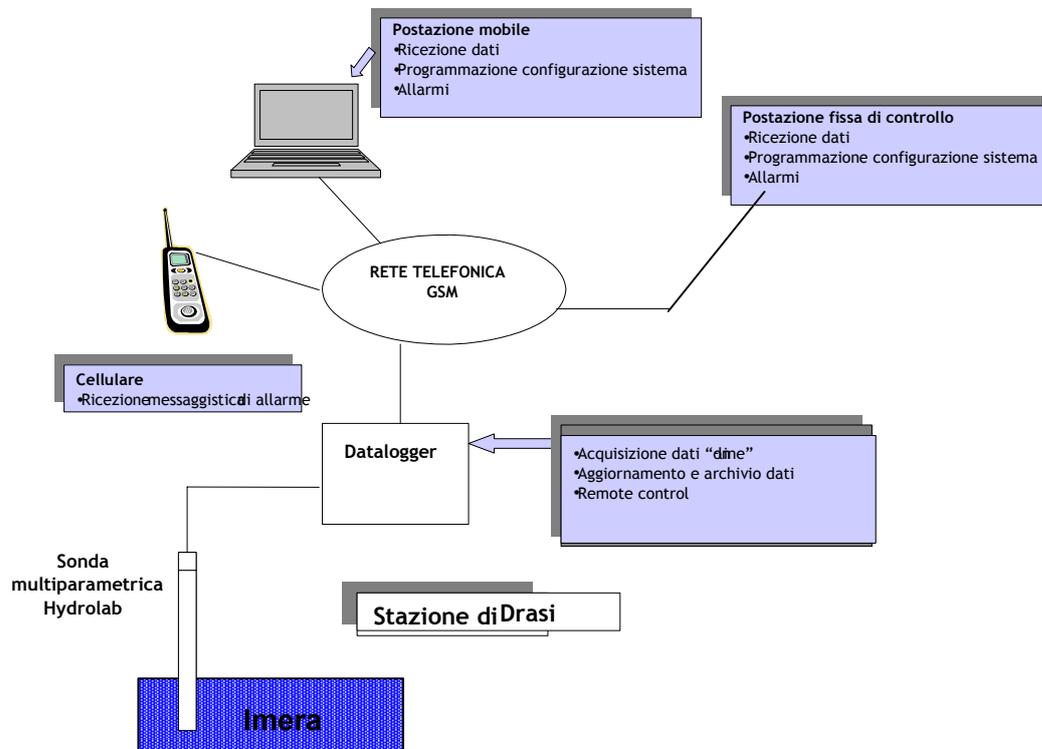
**Figura 6.7 - Particolare della discesa del cavo**

La sonda è equipaggiata con i sensori di Temperatura, Conducibilità, Salinità, pH, Potenziale Redox, Ossigeno Disciolto con agitatore e sensore piezoresistivo di profondità.

La centralina è collegata, tramite rete GSM, ad una postazione di controllo (fissa o mobile) attraverso cui è possibile interrogare a distanza la centralina stessa per effettuare il *download* dei dati. Il sistema può anche inviare messaggi di allarme (SMS) su telefoni cellulari in caso di superamento di soglie predeterminate.

Lo schema di principio della rete è riportato in Figura 6.8.

**Figura 6.8 - Schema del sistema di controllo e acquisizione dati**

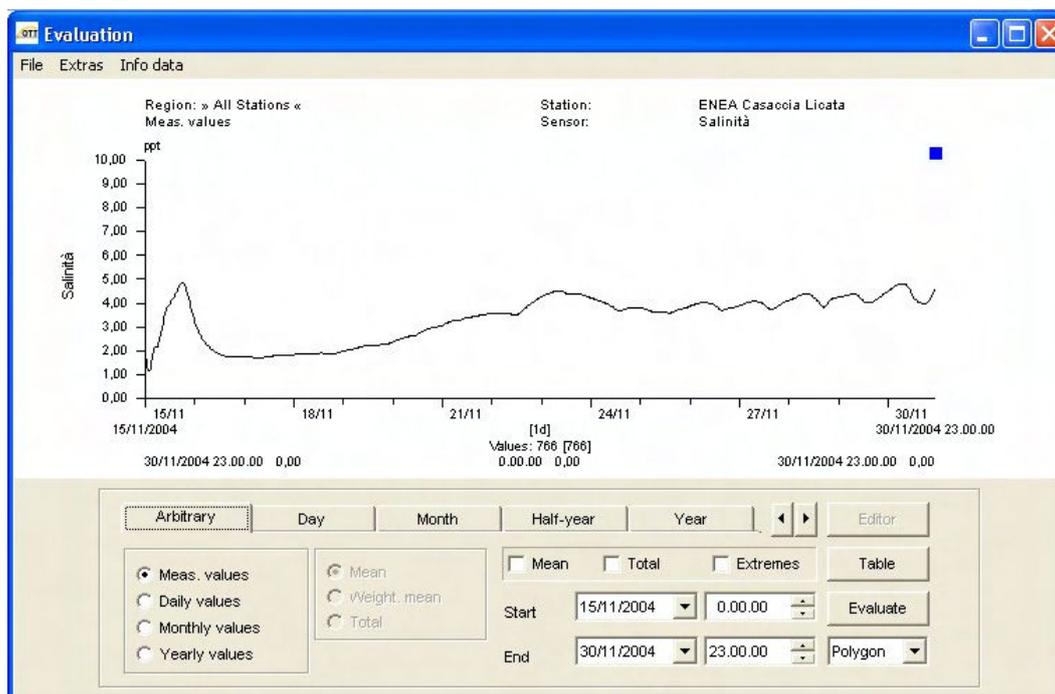


La centralina viene gestita mediante il pacchetto software Hydras 3, proprietario (OTT), sviluppato in ambiente Windows e dedicato all'acquisizione, il processamento e la gestione, dei dati.

Le sue caratteristiche essenziali, nella versione base, sono:

- scarico dei dati dalla centralina in locale, via RS232 e/o Infrarosso (IRDA), o da remoto via modem in linea commutata, e/o ISDN, e/o GSM;
- parametrizzazione e configurazione delle modalità di acquisizione;
- elaborazione grafica dei valori misurati con la possibilità di rappresentare simultaneamente fino a 6 grafici di 6 diverse serie di dati;
- archivio delle elaborazioni grafiche complesse;
- rappresentazione tabellare dei valori misurati;
- stampa dei dati sotto forma di grafici e di tabelle (Figura 6.9);
- funzione di import ed export di dati provenienti da altri acquisitori nel formato ASCII standard (incluso export dei dati in formato Excel);
- modalità grafica che permette la visualizzazione di una cartografia digitalizzata dove le stazioni di misura sono indicate con simboli grafici, e la comunicazione o l'accesso al database dei dati vengono attivati con un semplice doppio click sul simbolo grafico prescelto.

Figura 6.9 - Schermata grafici del software di gestione ed elaborazione



## 6.4 Conclusioni

Il sistema ha iniziato ad effettuare il monitoraggio della qualità delle acque a partire dal mese di novembre 2004.

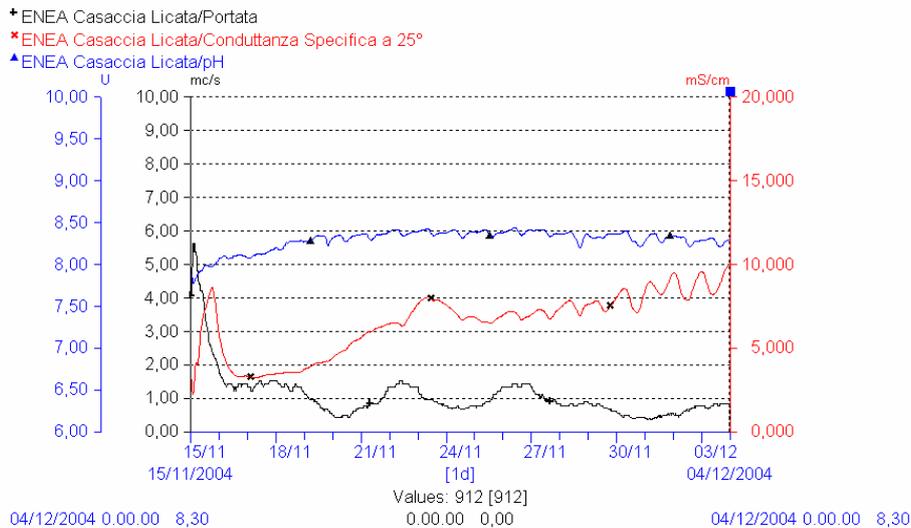
Oltre ai parametri chimico fisici, è stata rilevata anche l'altezza idrometrica allineando il valore misurato dalla sonda con quello rilevato dall'asta idrometrica presente nel sito.

Il grafico di Figura 6.10, ad esempio, mette in relazione l'andamento di 3 parametri, conducibilità, pH e portata.

Con altezze idrometriche superiori a un metro si ha il fuori scala di deflusso e le portate non sono attendibili. Durante l'evento piovoso avvenuto nei giorni 14 e 15 novembre 2004 si è avuta una piena e, in concomitanza del picco di portata massima, la conducibilità mostra il suo valore minimo, intorno a 1 mS/cm. Con il diminuire della portata la concentrazione risale rapidamente al valore massimo, raggiungendo oltre 8 mS/cm. Trascorso questo transitorio (della durata di circa 24 ore) dove la diluizione sembra essere l'unico fattore che influenza la concentrazione salina, la conducibilità inizia a salire anche se la portata del fiume oscilla intorno a 1 mc/s.

L'interpretazione di tale fenomeno non è immediata ma potrebbe trovare una sua giustificazione nelle considerazioni che seguono: l'acqua meteorica, una volta raggiunta la superficie del bacino dell'Imera meridionale scorre anche sulle superfici delle rocce saline affioranti. La dissoluzione avviene però in maniera significativa laddove il contatto con l'acqua è prolungato. Questo avviene principalmente a fondo valle, nel letto subalveo del fiume coperto da detriti. Nel sottile strato liquido aderente alla superficie del salgemma si avrà velocità nulla.

**Figura 6.10 - Tre parametri misurati dalla sonda nel periodo novembre-dicembre 2004**



In questa zona ciascun costituente si potrà trovare alla concentrazione di equilibrio con la fase solida, ossia alla concentrazione di saturazione.

La concentrazione delle sostanze saline disciolte nelle acque dell'Imera (principalmente solfati e cloruri) è riconducibile a quello di un equilibrio chimico di dissoluzione, e cioè all'equilibrio di distribuzione degli elementi tra le fasi solide da una parte, ed una fase fluida, costituita da una soluzione acquosa molto diluita, dall'altra.

Poiché il salgemma ha valori di permeabilità estremamente bassi ed è praticamente privo di pori e fratture, la diffusione dallo strato saturo deve considerarsi non immediata e dipende dalla velocità dell'acqua ovvero dalla turbolenza di quest'ultima. Quindi il problema del raggiungimento dell'equilibrio di saturazione fra il salgemma e l'acqua che lo permea è ricondotto a quello dell'equilibrio tra la fase solida e lo strato saturo alla sua superficie.

Da questa considerazione troverebbe giustificazione l'incremento graduale della salinità dopo la fase transitoria della piena, dovuta appunto ad un rilascio degli strati saturi in ritardo rispetto all'onda di piena. Naturalmente il fenomeno della dissoluzione è regolato anche dalla temperatura. La dissoluzione del NaCl è un processo endotermico\*, per cui lo scioglimento del NaCl viene favorito da un aumento della temperatura\*.

Il periodo di funzionamento della sonda nel sito di Drasi è risultato essere troppo breve per consentire una sufficiente valutazione della salinità delle acque del Fiume Imera in seguito a variazioni stagionali di tipo climatico, particolarmente severe nei periodi estivi per l'incombenza della siccità o per fenomeni piovosi di notevole intensità.

\* Il calore di soluzione  $\Delta H^\circ$  (a diluizione infinita) a 25 °C in acqua del cloruro di sodio è 928 cal/mole (da National Standards Reference Data System NSR DS - NBS L "ΔH° a diluizione infinita a 25 °C per elettroliti univalenti in acqua").

\* La solubilità del NaCl a temperatura ambiente è 36 g/100 g di H<sub>2</sub>O e aumenta anche se di poco) all'aumentare della temperatura (circa 40 g/100 g di H<sub>2</sub>O a 100 °C).

Purtroppo un evento di piena di eccezionale intensità occorso nel mese di dicembre del 2004, ha seriamente danneggiato la struttura di sostegno e la stessa sonda.

L'onda di piena sembra inoltre aver modificato significativamente la sezione idrografica e, di conseguenza, reso necessaria una ricalibrazione della scala di deflusso.

Tuttavia l'esperienza effettuata è stata sufficiente a dimostrare lo sfasamento temporale tra la concentrazione salina delle acque e la portata del fiume, parametro estremamente dipendente dalle condizioni climatiche e dal tipo di precipitazioni che interessano il bacino del fiume Imera.

Un monitoraggio sistematico ed esteso per lunghi periodi (qualche anno) potrebbe consentire la definizione di regole e la messa a punto di modelli per stimare la concentrazione salina attesa in determinate condizioni climatiche, fatto salvo l'eventuale contributo alla salinità da parte delle attività estrattive presenti nell'area del bacino.

Il danneggiamento subito dalla sonda e la necessità anche alla luce della modifica dell'alveo fluviale ha imposto un lungo periodo di stop delle attività e un riposizionamento e rinforzo delle strutture di protezione della sonda. La sonda è tornata di nuovo operativa nell'estate del 2006 e attualmente continua ad acquisire dati, sebbene ancora non siano disponibili i dati di portata.

Nelle figure da 6.11 a 6.14 vengono riportati i grafici relativi ai parametri chimico-fisici misurati dalla sonda nel periodo dal 27 luglio al 23 ottobre 2006. Nel mese di settembre 2006, è stata effettuata anche una verifica della taratura della sonda che ha consentito di stabilire la capacità dello strumento a mantenere un buon livello di affidabilità.

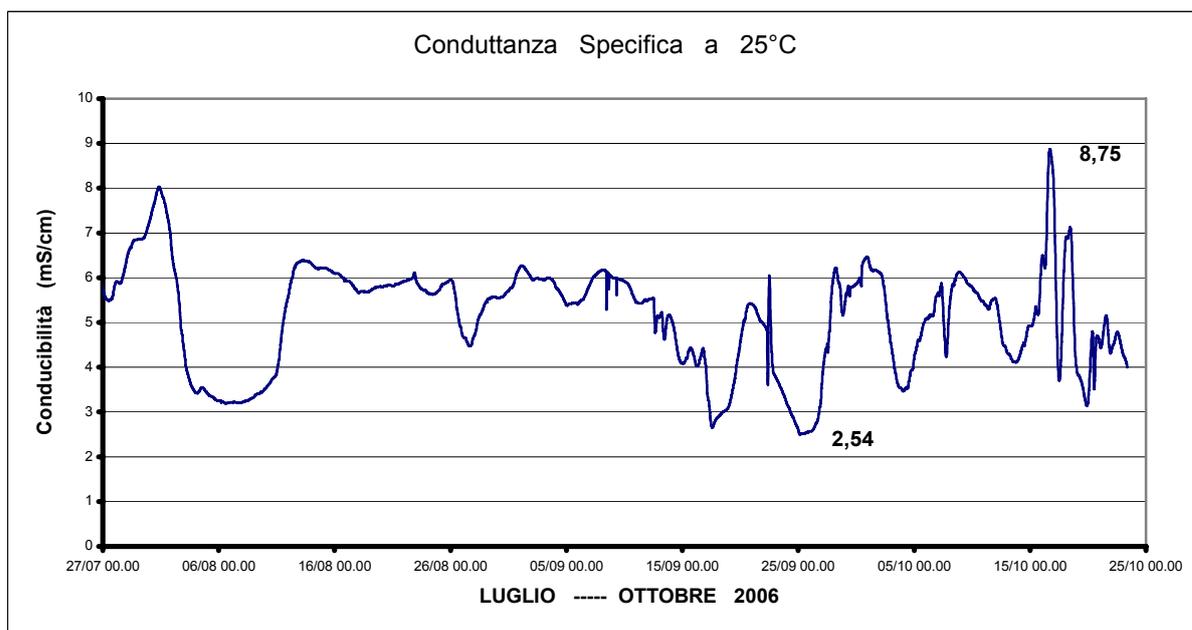
Nel periodo trascorso dalla data di installazione, circa tre mesi, la sonda ha fornito dati con continuità, ciò ha consentito di effettuare una prima valutazione e interpretazione delle peculiarità delle acque fluviali. Dall'analisi dei grafici sopra riportati si può rilevare quanto segue:

Conducibilità: i valori ottenuti nel periodo di monitoraggio risultano in genere piuttosto elevati e rispondenti alle caratteristiche saline del fiume; nei primi e negli ultimi giorni di agosto e nell'ultimo periodo preso in considerazione, si possono rilevare sensibili diminuzioni dovute, probabilmente, a giorni di particolare piovosità.

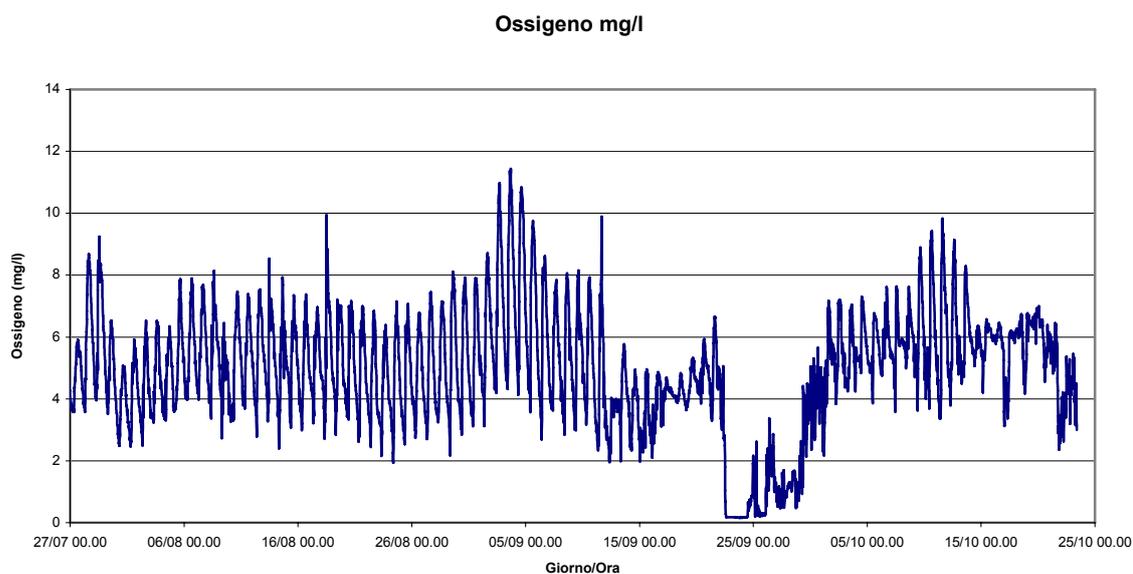
Ossigeno disciolto: i valori ottenuti mostrano oscillazioni parallele a quelle riscontrate per la temperatura (Figura 6.14), ciò sembra in contrasto con la legge di Henry per la quale la concentrazione di O<sub>2</sub> disciolto diminuisce con l'aumentare della temperatura: la giustificazione di tale fenomeno può essere attribuita al fatto che nelle ore del giorno, con alta insolazione e temperatura più elevata, risulta piuttosto efficiente l'attività fotosintetica di microorganismi algali con considerevole produzione di ossigeno, mentre nelle ore notturne diviene prevalente il suo consumo da parte dei microorganismi aerobici; i bassi valori minimi dell'oscillazione riscontrati nelle ore notturne, sono ragionevolmente da attribuire alla vicinanza della sonda al fondale, ove prevale una fase spiccatamente anossica.

A commento di questa prima raccolta di dati attraverso il dispositivo multiparametrico, si può affermare che la loro piena utilizzazione ai fini del controllo, anche predittivo della salinità delle acque del fiume, non può prescindere dalla misura della portata. Purtroppo le piene recenti hanno profondamente modificato la sezione fluviale imponendo una sua nuova misurazione da parte del servizio idrografico preposto.

**Figura 6.11 - I dati di conducibilità misurati da luglio a ottobre 2006**

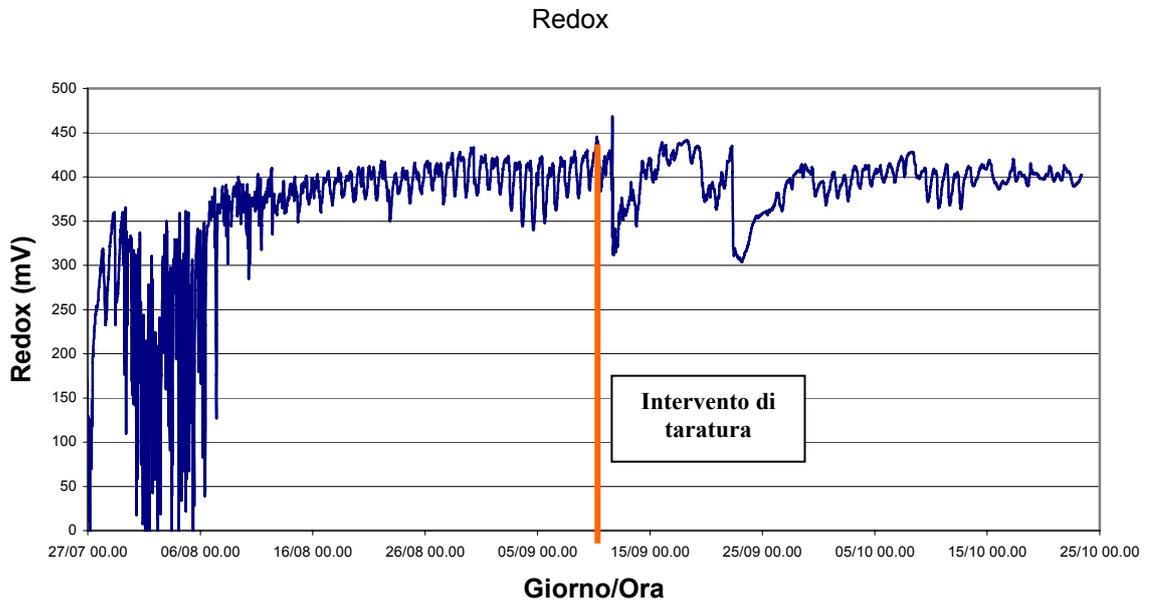


**Figura 6.12 - L'andamento dell'ossigeno disciolto da luglio a ottobre 2006**

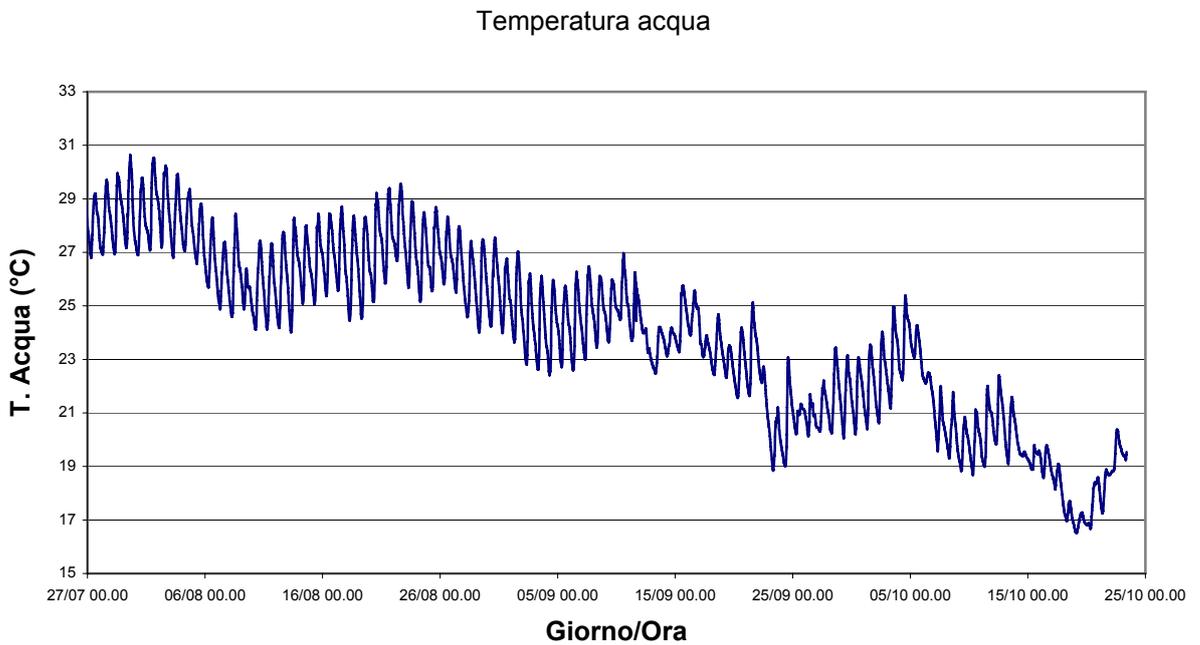


La sonda sarà comunque mantenuta operativa per poter elaborare un set di dati sufficiente a comprendere la relazione tra portata e salinità, la cui importanza pratica per gli agricoltori è evidente. I dati da essa prodotti sono già oggi resi disponibili alla locale stazione operativa in agricoltura che può agevolmente disporre di informazioni in tempo reale da fornire agli agricoltori al fine di poter usufruire di una risorsa preziosa, l'acqua del fiume, quando i livelli di salinità riscontrati sono al di sotto di valori soglia predeterminati.

**Figura 6.13 - Le anomalie iniziali del dato Redox**



**Figura 6.14 - I dati di temperatura dal 27 luglio al 24 ottobre 2006**



## 7. L'INDAGINE DEGLI ACQUIFERI SICILIANI CON LA TECNICA DELLA SPETTROFLUORIMETRIA LASER

Antonio Palucci, Luca Fiorani

### 7.1 Introduzione

Il laboratorio di telerilevamento del Centro di Ricerche ENEA di Frascati, ha partecipato alle attività del progetto RIADE con l'obiettivo di mettere a punto tecniche di analisi innovative per l'estrazione e la determinazione di variabili climatiche, ambientali e fornire indicazioni sull'inquinamento e l'eutrofizzazione dei bacini acquiferi tramite la tecnica di spettrofluorimetria laser.

### 7.2 La tecnica di spettrofluorimetria laser

L'uso della tecnica di spettrofluorimetria laser per l'analisi di parametri fisici, chimici e biologici nei corpi idrici è stato abbondantemente descritto in rapporti ENEA e pubblicazioni internazionali. In particolare, tale tecnica è stata utilizzata per sviluppare strumentazione volta al telerilevamento atmosferico, dei suoli e delle acque, con la partecipazione a differenti campagne sperimentali in ambito nazionale, comunitario ed internazionale.

La tecnica di fluorescenza indotta da radiazione laser (LIF, Laser Induced Fluorescence) si basa sull'eccitazione di un campione liquido da parte di opportuna radiazione nel range dell'ultravioletto (UV, 200-360 nm) e nella raccolta del segnale generato dalla presenza di particelle sospese, liquide o solide, dette *idrosol*. Queste particelle possono essere suddivise in materia inorganica ed organica; quest'ultima, a sua volta, viene distinta in particellata (POM), fitoplancton, e disciolta (chomoforic dissolved organic matter, CDOM).

Il materiale inorganico è per lo più costituito da sali e da detriti di origine minerale o materia inorganica di scarto prodotta da organismi presenti nelle acque.

Il fitoplancton è l'insieme degli organismi vegetali di piccole dimensioni (da 0,2  $\mu\text{m}$  fino a 200  $\mu\text{m}$ ) che vivono sospesi senza mobilità, sia in acque dolci che salate, e rappresenta, insieme alle spoglie degli organismi marini, la sostanza organica particellata presente nelle acque.

Il materiale organico disciolto è in maggior parte composto da acidi organici (umici e fulvici) e da gruppi ammino-acidi contenenti proteine, derivanti sia dalla degradazione di organismi vegetali, animali o batterici nel suolo, che algali (essudati), ed è quindi legato all'attività biologica. Prodotti di scarico dovuti a contaminazione da eluiti urbani possono contribuire notevolmente ad aumentare il tasso di CDOM presente nelle acque. Nelle sostanze organiche disciolte possono inoltre essere riconosciute con la tecnica LIF anche sostanze proteiche appartenenti al gruppo delle Tirosine e dei Triptofani, indicatori a loro volta dell'attività biologica in essere nelle acque. Occasionalmente, possono contribuire alla fluorescenza anche minerali inorganici come  $\text{UO}^{2+}$  e  $\text{Mn}^{2+}$ .

L'analisi spettrale del segnale raccolto dopo l'eccitazione permette, con l'ausilio di opportuni algoritmi, di risalire alla presenza di sostanze organiche disciolte o sospese. In particolare, nel caso delle alghe è possibile riconoscere presenza e concentrazione di molti pigmenti come clorofilla *a* (Chl-*a*), considerata un indicatore della distribuzione della biomassa, o ficoeritrina e ficocianina o ancora i pigmenti appartenenti al gruppo dei carotenoidi (xantofille, NaPDH, fucoxantine).

In questo ultimo caso, si preferisce utilizzare sorgenti laser operanti nel vicino UV o visibile (@ 430 nm). In Figura 7.1 è riportata, a titolo di esempio, la fluorescenza risolta spettralmente di un campione di acqua di pozzo prelevato a Licata, indotta con eccitazione a 266 nm. Si nota, a partire dalle lunghezze d'onda più corte, il picco del laser, l'emissione dovuta allo scattering Raman dell'acqua che sposta la frequenza della radiazione di una quantità costante, producendo un'emissione a 290 nm.

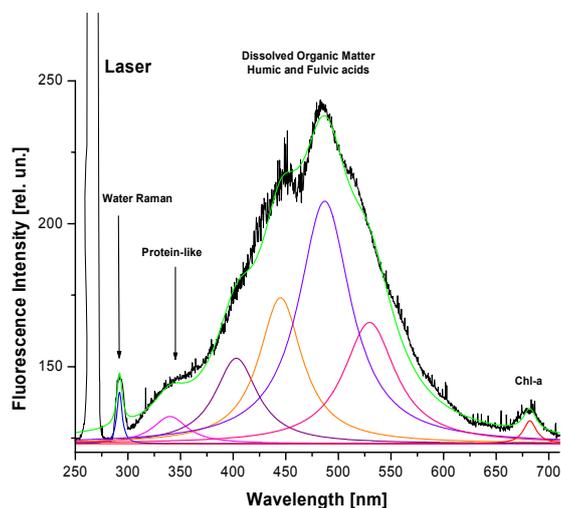
Ulteriori bande larghe seguono nello spettro, relative alle sostanze proteiche naturali come i triptofani (@ 340 nm), alla sostanza organica disciolta (acidi umici e fulvici; @ 450 nm) e alla Chl-a algale, caratterizzata da un picco d'emissione nel rosso (@ 680 nm). Lo spettro presenta una complessità di contributi che è necessario riprodurre con tecniche di fit non lineari, utilizzando funzioni di tipo Lorenziano.

La tecnica LIF permette inoltre di ricavare informazioni sulla trasparenza delle acque analizzate e rivelare la presenza di eventuali inquinanti dispersi nelle acque (oli grezzi o raffinati, PCB ed altro).

Gli strumenti che implementano questa tecnica, come i fluorimetri o i sistemi laser a fluorescenza, permettono di ottenere informazioni in tempo reale, senza contatto, su vaste aree e sul campione tal quale.

L'utilizzo del laser per analisi ambientali è previsto anche nell'ambito della medicina del lavoro e, in particolare, le tecniche laser sono utilizzate per rilevamenti atmosferici con metodi lidar-dial e per la misura della contaminazione superficiale marina con sensori di fluorescenza. Enti od organismi quali la NASA, il governo canadese o l'esercito tedesco hanno sistemi operativi su vettori volanti per l'indagine a distanza delle acque marine.

**Figura 7.1 - Analisi spettrale di un campione di acqua di pozzo prelevato a Licata nel 2003**



### 7.3 Le campagne di misura

Nell'ambito del progetto RIADE, sono state svolte due campagne di misura nelle aree di Licata e di Siracusa, la prima dal 20 al 25 ottobre 2003, la seconda dal 22 al 27 Maggio 2005. In questo rapporto ci soffermeremo solo sulle attività svolte a Licata: il lettore interessato al complesso delle indagini e ai dettagli è rimandato alle pubblicazioni citate in bibliografia.

In entrambe le campagne, sono stati eseguiti campionamenti negli acquiferi locali, nei pozzi di raccolta e di drenaggio e risalendo il corso dei maggiori affluenti. Le analisi sono state eseguite localmente utilizzando anche la strumentazione degli altri gruppi partecipanti al progetto.

Uno degli obiettivi della prima campagna è stato quello di prendere conoscenza delle problematiche coinvolte nei territori da monitorare, mentre nella seconda è stato possibile provare in campo lo spettrometro laser appositamente sviluppato per RIADE (CASPER, Compact and Advanced laser SPEctrometer for Riade).

**Tabella 7.1 - Siti di campionamento nel bacino Imera/Salso**

Sito	Note
Licata	Pozzi di raccolta acqua
Licata	Passarello, Acquedotto Greco, Sorgente Grangela, Contrada Cerci
Licata	Foce Fiume Imera Meridionale - Salso
Salso	Corso del Fiume Imera M.
Alimena	Affluenti del Fiume Salso

Nella zona di Licata sono stati campionati alcuni pozzi nella falda freatica, utilizzati per l'irrigazione dei terreni coltivati e, successivamente, è stato campionato il fiume Imera, risalendo dalla sua foce verso monte e prelevando campioni dai vari affluenti incontrati (Tabella 7.1).

Il settore centro-meridionale della Sicilia è caratterizzato dalla presenza di depositi evaporitici, sedimenti dovuti all'evaporazione di un bacino marino che rimane isolato e sul cui fondo si depositano i sali contenuti in acqua. Si tratta di depositi dell'Era Terziaria, più esattamente del Miocene superiore, che si trovano in quasi tutti i paesi che circondano il bacino del Mediterraneo. La morfologia di questi territori è tipicamente collinare, di natura arenacea e calcarenitico-sabbiosa a est (Monti Erei) e gessoso-solfifera ad ovest; in particolare nelle successioni gessoso-solfifere della serie evaporitica, l'elemento più diffuso è costituito dai gessi, con presenza, a causa dell'elevata solubilità della roccia, di diffusi fenomeni di erosione carsica.

Per la prima campagna, il nostro gruppo ha modificato il proprio laboratorio mobile di telerilevamento laser ENVILAB (ENVIronmental LABoratory), allestendo la strumentazione atta all'implementazione della tecnica di spettrofluorimetria laser (Figura 7.2).

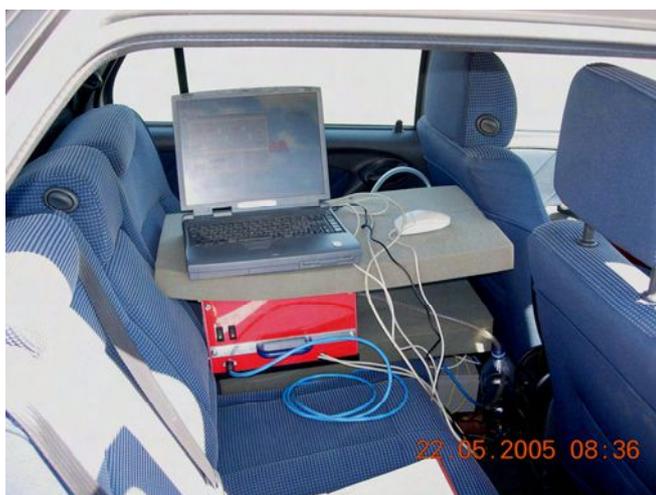
In altre parole, la prima campagna non si è limitata ad effettuare il monitoraggio degli acquiferi ma ci ha permesso di ottenere i parametri per sviluppare il sensore portatile CASPER utilizzato direttamente in campo (Figura 7.3).

Passiamo ora a descrivere entrambi gli allestimenti.

**Figura 7.2 - Il laboratorio mobile ENVILAB del Centro Ricerche ENEA di Frascati utilizzato durante la prima campagna in Sicilia**



**Figura 7.3 - Il fluorimetro laser CASPER del Centro Ricerche ENEA di Frascati utilizzato durante la seconda campagna in Sicilia**

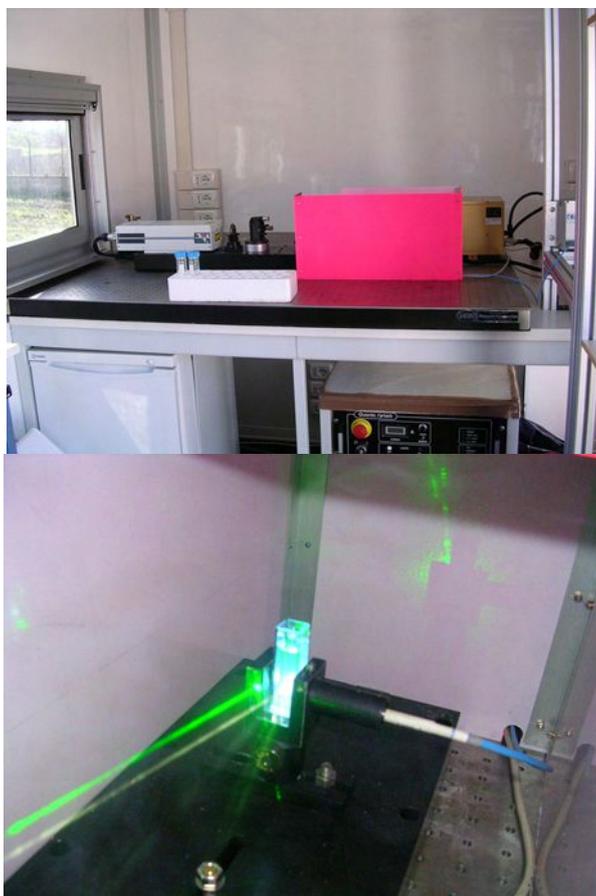


### **7.3.1 Il laboratorio ENVILAB**

All'interno del mezzo mobile è stata allestita la strumentazione per il trattamento e l'analisi dei campioni, composto da un apparato per la spettrofluorimetria laser a due lunghezze d'onda (Figura 7.4). Il sistema è basato sull'uso di due sorgenti laser, che emettono rispettivamente a 266 e 355 nm, un portacampione (cuvette), una fibra ottica ed un analizzatore spettrale. I fasci delle due sorgenti laser vengono sovrapposti spazialmente ed inviati nella cuvette ove viene introdotto il campione; la fibra ottica, posizionata a 90° rispetto all'asse ottico dei fasci laser, raccoglie la radiazione diffusa e fluorescente emessa. Il segnale ottico a larga banda viene inviato sullo spettrometro per l'analisi e l'acquisizione dei dati.

Un cilindro legato ad una fune, equipaggiato con due valvole sul fondo che si aprivano automaticamente se sottoposte a pressione idrostatica, costituiva il campionatore locale.

**Figura 7.4 - Foto sopra: apparato per la spettrofluorimetria laser: il primo laser si trova a sinistra, nella scatola di plexiglas è alloggiato il portacampione e nello sfondo si vede il secondo laser. Foto sotto: dettaglio dei fasci laser inviati sulla cuvette e fibra ottica**



Per gli acquiferi che presentavano una torbidità eccessiva si è provveduto ad eseguire una filtrazione prima di procedere alle analisi spettrofluorometriche. La presenza eccessiva di materiale inorganico sospeso è stata attribuita alle intense precipitazioni cadute nella zona nel periodo precedente al monitoraggio. Le analisi sono state effettuate nella vicinanza del sito campionato.

Come abbiamo già anticipato, l'esperienza maturata durante la prima campagna è stata utile per la progettazione del sensore da campo.

### **7.3.2 CASPER (Compact and Advanced Laser Spectrometer for Riade)**

Alla base dello sviluppo di questo nuovo strumento portatile c'era la necessità di combinare la possibilità di eseguire misure di componenti organiche naturali (acidi umici, sostanze proteiche, essudati) od inquinanti (derivati dalla lavorazione del petrolio) nella regione del vicino UV e contemporaneamente avere informazioni sulla presenza di particolato organico (alghe).

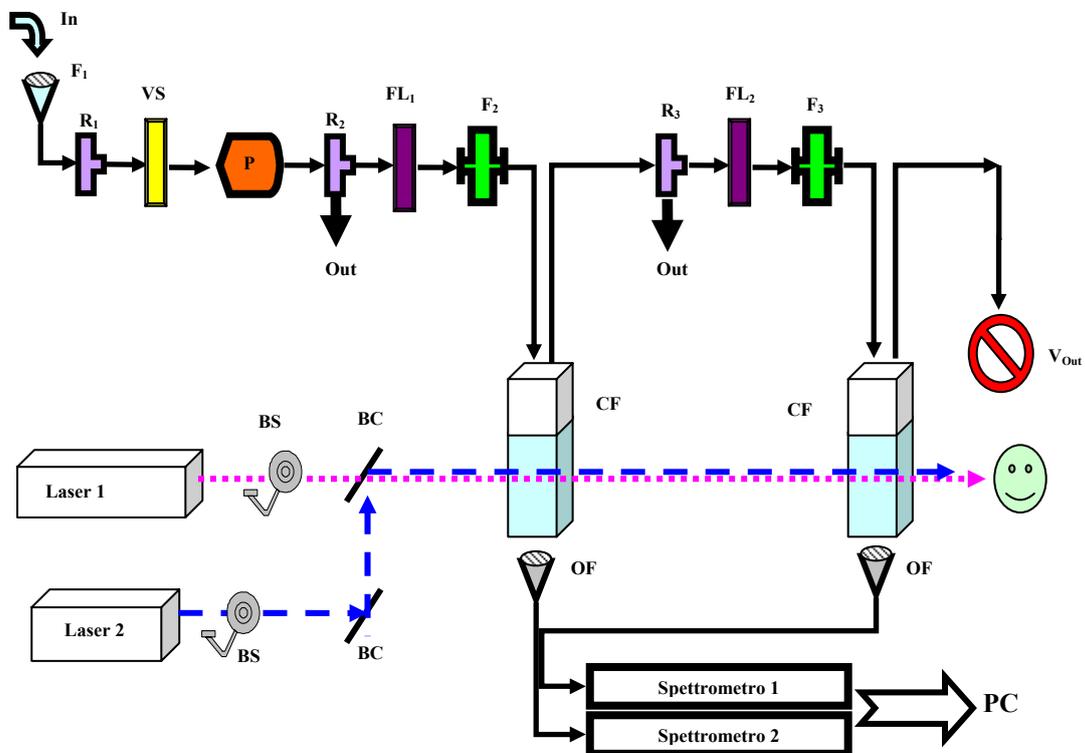
Questa richiesta non poteva essere soddisfatta utilizzando una sola sorgente laser di eccitazione in quanto le lunghezze d'onda nel vicino UV sono poco efficienti per la determinazione dei pigmenti algali che vengono meglio osservati utilizzando lunghezze d'onda nel visibile. In conseguenza, si è scelto di operare con due distinte sorgenti di eccitazione e di adottare due differenti analizzatori spettrali per separare il contributo del particolato dal disciolto. Lo strumento sviluppato è stato brevettato.

Nella Figura 7.5 è mostrato lo schema concettuale dell'apparato durante la sua fase iniziale di progettazione. Il campione d'acqua viene filtrato sommariamente dal primo filtro ( $F_1$ ) per eliminare impurezze grossolane ed introdotto nel circuito all'apertura della prima valvola ( $R_1$ ). Il flusso iniziale viene controllato dalla valvola di sovrappressione (VS) e successivamente viene inviato nel circuito dalla pompa peristaltica (P).

La seconda valvola ( $R_2$ ) nella posizione di aperto immette il liquido nel circuito, altrimenti, quando è chiusa, scarica all'esterno. Il flusso del campione, controllato dal primo flussometro ( $FL_1$ ), subisce una filtrazione più fine ( $30\ \mu\text{m}$ ), attraverso  $F_2$ , prima di essere introdotto nella prima cella per l'analisi di fluorescenza (CF). In questa fase si permette il passaggio di componenti organici come le alghe che possono essere presenti nelle acque naturali.

All'uscita, il liquido può essere eliminato all'esterno o passare all'ultima filtrazione nella parte terminale del circuito idraulico. Il flusso viene controllato da  $FL_2$  e, attraverso  $F_2$ , subisce una ultrafiltrazione ( $0,22\ \mu\text{m}$ ) che elimina tutto il particolato organico ed inorganico presente lasciando solo la componente organica disciolta.

Figura 7.5 - Schema a blocchi di CASPER



Il campione così trattato viene introdotto nella seconda cella per l'ultima analisi di fluorescenza (CF) prima di essere eliminato.

Un PC-notebook è stato dedicato all'acquisizione dei dati ed al funzionamento dell'intero apparato tramite una scheda di controllo che verrà descritta nel seguito. In Figura 7.6 viene mostrato l'apparato realizzato.

**Figura 7.6 - Foto dell'apparato CASPER assemblato in laboratorio**



#### **7.4 Risultati del monitoraggio**

Nella zona di Licata, la strategia di campionamento ha seguito essenzialmente due tipologie: i pozzi di raccolta a cielo aperto, l'Acquedotto Greco e la Sorgente Grangela, da una parte, e i prelievi lungo l'asta del fiume Imera/Salvo con i suoi affluenti, dall'altra.

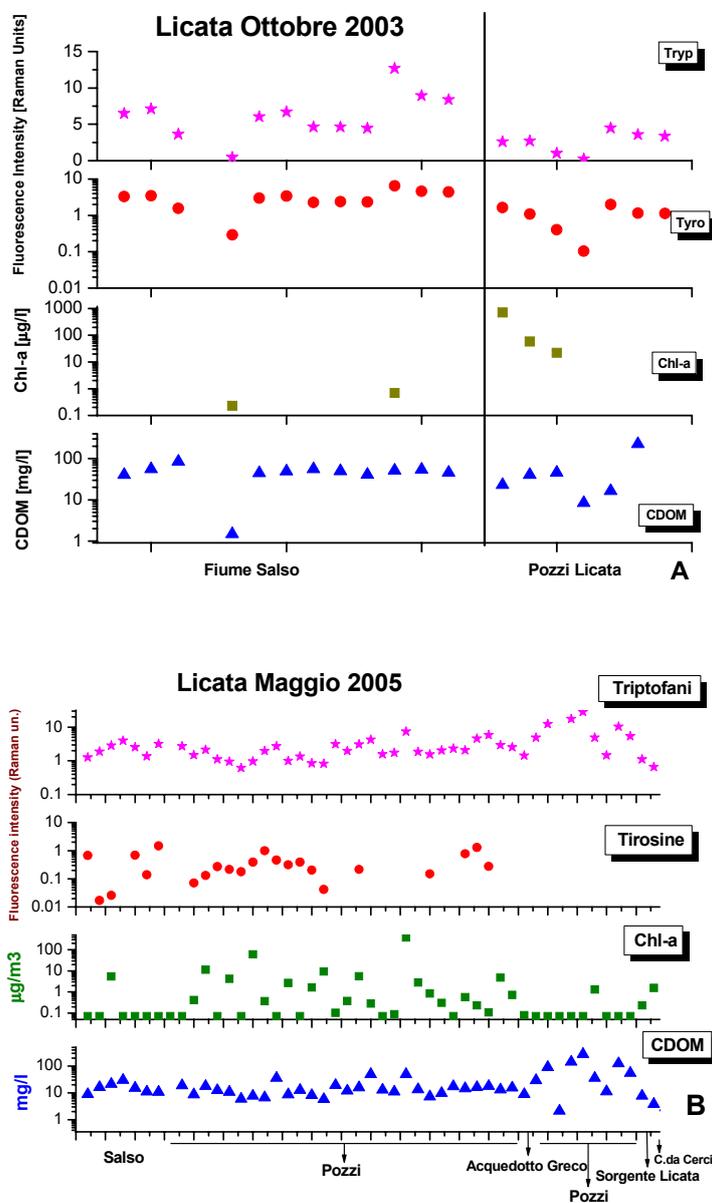
In totale i campionamenti eseguiti in questa zona sono risultati 19 nella prima campagna, e 49 nella seconda. Questo incremento dei campioni è stato possibile grazie all'impiego del nuovo apparato che è risultato più agevole e trasportabile direttamente sul sito da esaminare. I dettagli sui risultati delle singole campagne, sulle tarature e sui protocolli di analisi sono descritti in dettaglio nei rapporti ENEA, mentre qui vengono riportati solo i dati di Licata.

In Figura 7.7, sono mostrati i valori misurati per i maggiori componenti (Tirosine, Triptofani, CDOM e Chl-a) durante la prima (Figura 7.7A) e la seconda (Figura 7.7B) indagine nella zona di Licata.

In generale possiamo affermare che, in questa zona della Sicilia meridionale e centrale, non sono state rilevate tracce di inquinanti organici o sostanze tossiche.

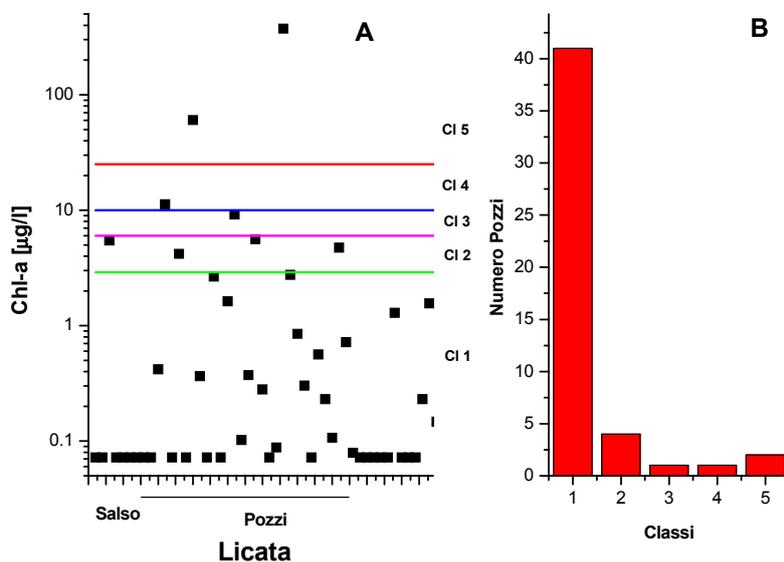
I valori di sostanza organica disciolta mostrano la tendenza ad incrementare scendendo dalle sorgenti dell'Imera, presso Resuttano, fino alla foce vicino al porto di Licata. La presenza di sostanze algali è scarsa in queste acque a causa dell'elevata salinità presente. Questo andamento è confermato per entrambe le campagne.

**Figura 7.7 – Andamento dei canali di emissione del CDOM (▲), della Chl-a (■), della tirosina (●) e del triptofano (\*) misurati a Licata durante: A) la prima campagna (ottobre 2003) e B) la seconda campagna (maggio 2005)**



I pozzi, per la loro peculiarità di essere dei bacini a cielo aperto (bocca di pozzo di 5-6 metri di diametro) presentano delle elevate concentrazioni di sostanza organica disciolta e sospesa. In queste condizioni, anche le alghe trovano il terreno ottimale per riprodursi. I valori più elevati di CDOM, per la prima campagna, sono stati riscontrati nei due pozzi abbandonati della zona Passarello, dove anche la concentrazione algale risulta molto alta. Tale comportamento è stato attribuito allo scarso ricambio idrico.

**Figura 7.8 - Valori di Chl-a misurati nella zona di Licata: A) distribuzione nel territorio con indicazione delle fasce di differenti classi definite nel decreto legislativo n. 152 dell'11/5/1999; B) istogramma della distribuzione per le singole classi**



Di tasso inferiore, ma mediamente molto elevati, tutti i dati di sostanza organica negli altri pozzi. In questi pozzi a cielo aperto, i valori della sostanza organica sono elevati e piuttosto costanti.

La situazione è più articolata per quanto riguarda la Chl-a, riportata in Figura 7.8A e Figura 7.8B, dove i dati possono variare di 4 ordini di grandezza da caso a caso. Si ricorda che la Chl-a è utilizzata come uno dei parametri macrodescrittori per quanto riguarda la definizione dello stato ecologico dei laghi e delle acque marine costiere in quanto è un indicatore di biomassa autotrofa.

Riprendendo la classificazione delle acque di lago, che più si avvicinano come tipologia a quelle di pozzo, in base ai valori limite di Chl-a, descritta nel decreto legislativo n. 152 dell'11 maggio 1999, si osserva in Figura 7.8 che la maggior parte dei valori sono distribuiti nella prima fascia, cinque nella seconda, uno nella terza e nella quarta e due nella quinta classe. Quindi, in conclusione, il quadro che si ottiene sulla situazione trofica della zona non è allarmante.

Per facilitare il confronto, riportiamo in Tabella 7.2 i dati medi misurati nelle due campagne raggruppando i siti comuni nella stessa area o della stessa tipologia per la zona di Licata, anche se in campo la loro distribuzione è più articolata in particolare per quanto riguarda la Chl-a, come visto precedentemente.

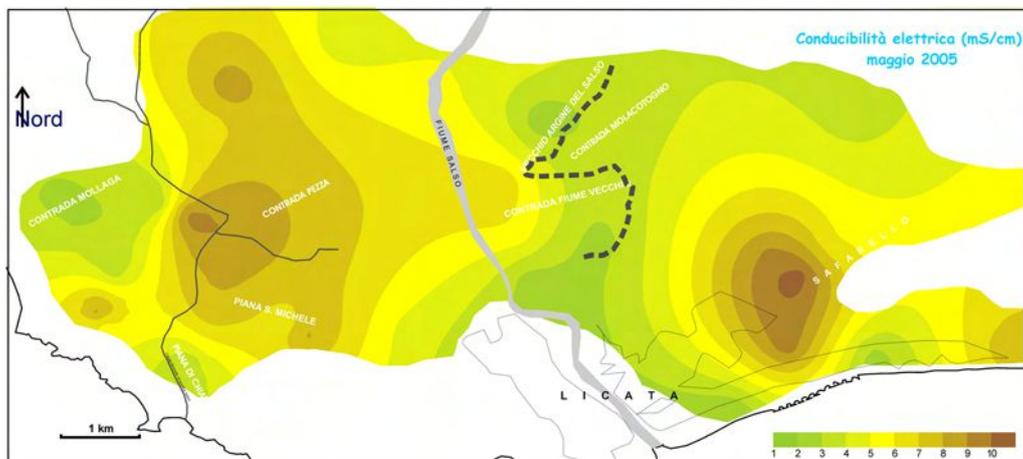
Per la seconda campagna si è osservata una diminuzione di oltre il 50% del contenuto delle sostanze organiche disciolte, sicuramente dovuta al minore contributo di particolato sospeso, mentre l'aumento della concentrazione media di Chl-a è dovuto al contributo del sito di prelievo vicino alla foce del fiume Salso. Lo stesso andamento medio si osserva anche per i valori misurati nei pozzi della piana di Licata, eccetto per il contributo della Chl-a che è notevolmente diminuito, forse a causa del differente periodo stagionale (maggio 2005 rispetto a ottobre 2003).

**Tabella 7.2 - Confronto dei valori medi misurati in Sicilia nelle due campagne di monitoraggio**

Area	Sito	Campagna	Tirosine [Ram. Un.]	Triptofani [Ram. Un.]	CDOM [mg/l]	Chl-a [µg/l]
Licata	Fiume Imera	1 <sup>a</sup>	3,11	6,18	47,0	< 0,1
		2 <sup>a</sup>	0,43	2,43	16,2	0,84
	Pozzi	1 <sup>a</sup>	1,07	2,56	72,10	138,0
		2 <sup>a</sup>	0,15	3,78	30,49	11,55

Per completezza, i dati organici misurati con il nostro fluorimetro laser portatile sono stati confrontati successivamente con quelli inorganici della conducibilità elettrica determinata in loco contemporaneamente dal gruppo del Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Ferrara. Come si può osservare dalla Figura 7.9, si possono distinguere due aree ad alta concentrazione salina: quella prospiciente alla costa (Contrada Safarello) e una più interna vicina al corso del fiume (Contrada Pezza). La prima area è stata indicata come area a rischio di intrusione del cuneo salino marino che proviene dalla costa, mentre la seconda è affetta dalla salinità del fiume Salso.

**Figura 7.9 - Distribuzione della conducibilità elettrica nella piana di Licata**



Sempre per la stessa zona è stato studiato l'andamento della distribuzione della sostanza organica misurata nei pozzi. È evidente l'anticorrelazione presente tra le due quantità, meglio definita dalla relazione lineare di Figura 7.10. Questo fenomeno è stato precedentemente descritto in letteratura ed è dovuto alla scarsa capacità di ritenzione di materiale organico da parte di terreni che subiscono un elevato apporto salino.

La concentrazione di Chl-a mostra la stessa distribuzione spaziale (Figura 7.11) del CDOM, a riprova che in condizioni di elevata conducibilità elettrica il terreno si impoverisce e mancano i presupposti per lo sviluppo algale.

Figura 7.10 - Confronto tra i dati di salinità e di CDOM misurati nei pozzi di Licata

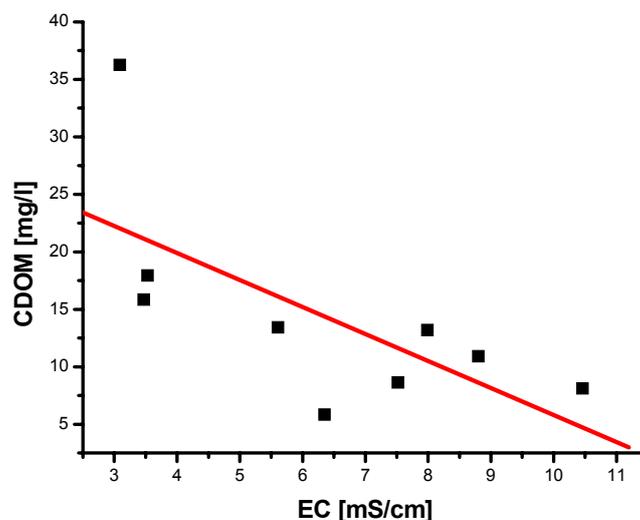
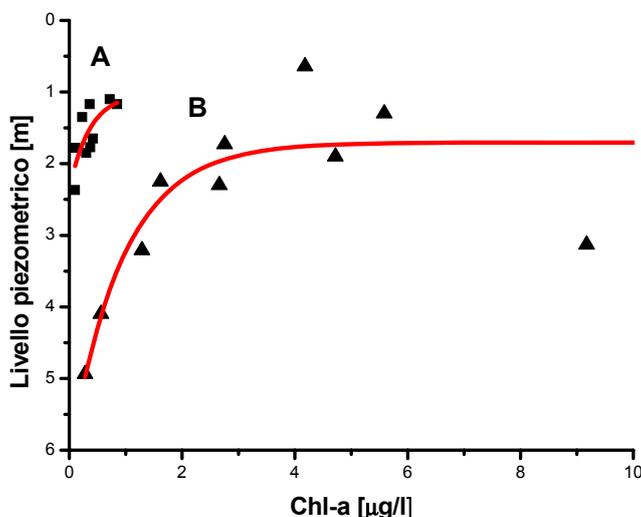


Figura 7.11 - Distribuzione di Chl-a nei pozzi della piana di Licata



È stato inoltre interessante osservare l'andamento della concentrazione di Chl-a al variare del livello piezometrico del pozzo analizzato. Come si può osservare dalla Figura 7.12, la produzione algale è favorita dal diminuire dello sfruttamento del pozzo e quindi dalla possibilità della luce di raggiungere l'acqua, come si evince dal differente andamento delle due curve (A e B) a seconda della zona interessata.

**Figura 7.12 - Variazione della Chl-a in funzione del livello piezometrico dei pozzi di Licata**



In conclusione, il progetto RIADE ha offerto l'opportunità di applicare con successo la tecnica di spettrofluorimetria laser alle acque di bacini interni, di corsi e di condotte d'acqua. Le problematiche di campionamento e trattamento del campione affrontate nelle campagne di misura in Sicilia, sono state di guida per sviluppare il nuovo prototipo di fluorimetro laser portatile CASPER.

Il nuovo dispositivo rappresenta un valido strumento di indagine della qualità ambientale, nel rispetto del decreto legislativo n. 152 dell'11 maggio 1999. Inoltre, grazie alla sua completa autonomia e trasportabilità, è stato possibile incrementare notevolmente il numero dei siti analizzati e fornire informazioni utili per la comprensione della dinamica biogeochimica degli acquiferi investigati, per la classificazione delle acque naturali, per il monitoraggio in tempo reale. In particolare, CASPER è risultato in grado di misurare alcuni parametri rilevanti ai fini degli studi sulla desertificazione con accuratezza e sensibilità sufficiente a rivelare variazioni stagionali.

Nella zona della piana di Licata è stato possibile collegare la diminuzione della sostanza organica disciolta e sospesa con gli elevati valori di conducibilità elettrica. Questo impoverimento del terreno ha un effetto di minore ritenzione delle acque e quindi contribuisce al lento processo di desertificazione.

Il nuovo strumento CASPER verrà utilizzato nell'ambito dei lavori di monitoraggio degli acquiferi dalla impresa INTREGA (Spin-off ENEA del progetto RIADE) e si prevede che riceverà richieste di impiego da parte di ditte specializzate italiane e non, operanti nel settore del trattamento delle acque reflue. Recentemente ha inoltre ricevuto il primo premio Ricerca & Innovazione 2005, promosso da BIC Lazio nell'ambito del Programma "Università e Impresa" per il trasferimento di tecnologie innovative e/o know-how, derivanti dalla ricerca.

## 8. STIMA DELL'EVAPOTRASPIRAZIONE EFFETTIVA PER L'OTTIMIZZAZIONE DELLA GESTIONE DI AREE IRRIGUE

Mario Minacapilli, Maurizio Sciortino, Gianemilio Salvetti, Stefano Natali

### 8.1 Introduzione

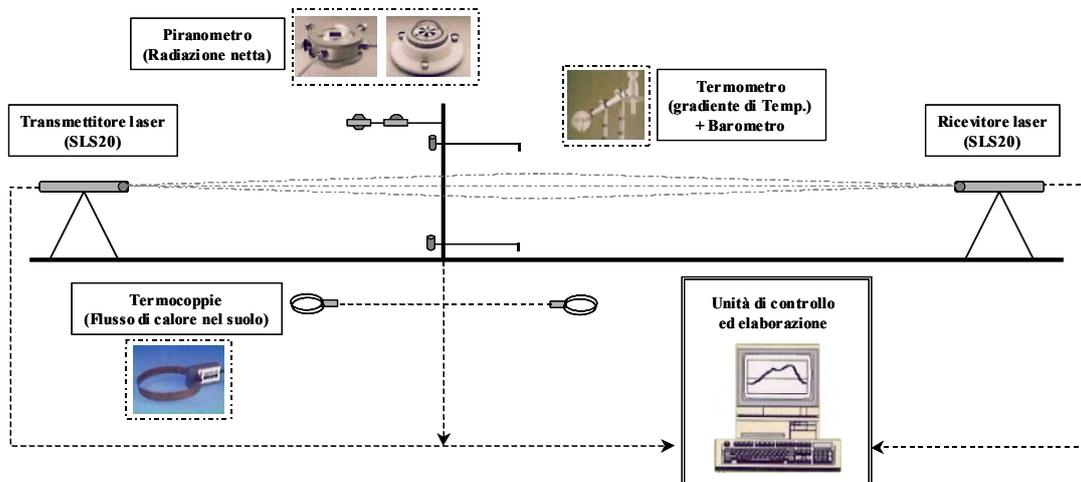
Il Progetto RIADE ha realizzato, nel periodo che va da giugno 2004 a settembre 2005, campagne di misura dei parametri fisici che concorrono nella definizione del bilancio energetico superficiale, con particolare riferimento ai problemi di gestione dell'irrigazione nelle zone climaticamente più aride della regione Sicilia.

La componente più significativa del bilancio è costituita dal flusso di calore latente, cioè la quantità totale di acqua trasferita all'atmosfera a seguito dell'evaporazione dal suolo e della traspirazione dalle piante come risultato dei loro processi metabolici. Il flusso di calore latente, anche chiamato evapotraspirazione, varia spazialmente e temporalmente in funzione di parametri di tipo geografico, meteo-climatico e vegetazionale. La complessa interazione tra questi parametri viene simulata da modelli su diverse scale spaziali e temporali; le campagne di misura realizzate hanno permesso di confrontare dati sperimentali e modellistici al fine di predisporre strumenti per una più efficace pianificazione e gestione dell'uso della risorsa idrica.

### 8.2 Lo scintillometro

Scintillazione è un termine generale che descrive variazioni di brillantezza di un oggetto visto attraverso l'atmosfera. Quando un segnale luminoso si propaga attraverso un'atmosfera turbolenta viene distorto dalle fluttuazioni dell'indice di rifrazione dell'aria causate da fluttuazioni turbolente della temperatura, umidità e pressione. Analizzando con uno scintillometro le fluttuazioni dell'intensità di un fascio laser è quindi possibile risalire alle fluttuazioni della temperatura, umidità e pressione dell'aria (Figura 8.1).

Figura 8.1 - Schema del sistema di monitoraggio dei flussi energetici superficiali mediante scintillometro laser



Il Surface Layer Scintillometer SLS20 della SCINTEC utilizza come sorgenti di luce due diodi laser operanti a 670 nm. Le ridotte dimensioni trasversali dei fasci laser permettono di interagire con i vortici di dimensioni più piccole, e conseguentemente di ricavare direttamente, oltre al parametro di struttura dell'indice di rifrazione,  $C_n^2$ , altri parametri micrometeorologici quali la 'scala interna',  $l_0$ , la lunghezza di Monin-Obukhov, che intervengono nel calcolo del bilancio energetico superficiale.

La presenza di due sorgenti laser rende possibile anche la misura del gradiente di dissipazione dell'energia cinetica turbolenta, legato direttamente alla velocità di attrito. Una volta noti questi parametri si ricava il parametro di struttura delle fluttuazioni di temperatura,  $C_T^2$ , a partire dal quale, attraverso la teoria di Monin-Obukof, viene derivato il flusso turbolento di calore sensibile.

Oltre al sistema trasmettitore-ricevitore, l'apparato di misura è dotato di una torre climatica equipaggiata con:

- ✓ tre sensori che misurano il flusso di calore dal suolo;
- ✓ un piranometro, per misurare la radiazione solare globale (quantità di energia captata da una superficie orizzontale) e un pireliometro, per calcolare la radiazione solare diretta;
- ✓ due termometri ventilati al platino;
- ✓ un sensore di pressione.

Tutti questi strumenti sono interfacciati con un sistema di controllo ed acquisizione dati che automaticamente calcola e registra i flussi di calore. Il sistema ha un tempo di campionamento di 6 secondi ed elabora i dati mediando su intervalli temporali di 2 minuti visualizzando in tempo reale l'andamento temporale di tutte le variabili misurate e calcolate.

Lo scintillometro SLS20 permette quindi di misurare e valutare, a partire da misure di parametri micrometeorologico, l'evapotraspirazione effettiva da una superficie vegetata ricorrendo alla ben nota equazione del bilancio energetico scritta nella seguente forma:

$$\lambda ET = R_n - G_0 - H \quad (1)$$

in cui  $\lambda ET$  [ $W/m^2$ ] è la densità di flusso convertita in calore durante il processo evapotraspirativo,  $R_n$  [ $W/m^2$ ] è la radiazione netta incidente,  $G_0$  [ $W/m^2$ ] è il flusso energetico impiegato nello scambio di calore nel suolo mentre  $H$  [ $W/m^2$ ] esprime il flusso energetico di calore sensibile, ossia lo scambio di calore tra la superficie e l'atmosfera.

L'evapotraspirazione è quindi valutata come differenza fra la radiazione netta incidente ed i flussi di calore di calore sensibile e di calore del suolo.

### 8.3 Descrizione dell'area di studio e delle indagini effettuate

L'area scelta per lo studio è parte del comprensorio irriguo siciliano "Lago Arancio" che si estende per circa 8000 ettari tra le provincie di Agrigento, Trapani e Palermo. Le colture più diffuse sono di tipo arboreo con prevalenza di olivo, vite ed agrumi.

Il comprensorio è servito da una rete idrica in pressione, di recente realizzazione, dotata di apparecchiature di telecomando e di telecontrollo che consentono la registrazione dei volumi consegnati alle singole utenze.

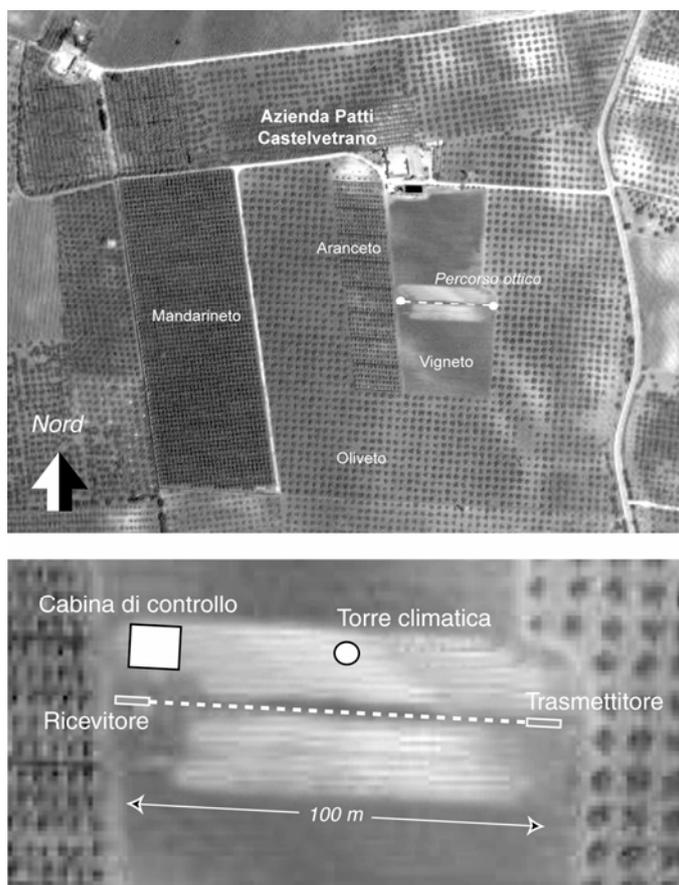
Dal punto di vista pedologico, nella zona occidentale dell'area considerata prevalgono i terreni pianeggianti caratterizzati da associazioni di suoli bruni a tessitura media o medio-sabbiosa, mentre nella zona orientale i terreni sono caratterizzati da una morfologia leggermente ondulata con prevalenza di vertisuoli di tessitura medio-limoso-argillosa.

Durante la stagione irrigua 2005 e 2006 è stata condotta un'intensa attività sperimentale, presso l'Azienda Agricola Patti a circa 5 km a sud di Castelvetrano, in provincia di Trapani (Lat 37:38 Nord, Long 12:50 Est, slm 118 m).

All'interno di un'azienda agricola sperimentale è stato predisposto, in collaborazione con il Servizio Informativo Agrometeorologico Siciliano (SIAS) un campo coltivato ad erba medica di estensione pari a circa 0,35 ha, periodicamente irrigato e sfalcato, mantenuto in regime di stress controllato con un'altezza colturale inferiore ai 50 cm.

L'area scelta è climaticamente caratterizzata da condizioni di tipo sub umido-secco, con attività produttive agricole irrigue ed è pertanto idonea alla caratterizzazione, in questo particolare ambiente, del bilancio energetico superficiale. Lo studio è stato condotto operando lo scintillometro sull'area coltivata ad erba medica. La superficie del terreno, sebbene pianeggiante ed omogenea, non soddisfa pienamente le condizioni di omogeneità spaziale nell'intorno a causa della presenza di altre colture nel raggio che influenza la misura. Le misure di scintillometria sono state effettuate su un percorso ottico di 100 m (Figura 8.2) compreso tra terreni coltivati ad olivo, arancio e vite.

**Figura 8.2 - Foto aeree del sito sperimentale di Castelvetrano**



La campagna di misure, condotta a Castelvetro, ha coperto un periodo totale di circa 130 giorni. In questo intervallo di tempo lo scintillometro ha raccolto dati per 82 giorni: a causa di temporanee interruzioni dell'erogazione di energia elettrica della rete o a seguito del disallineamento del sistema provocato da agenti esterni (forte vento o uccelli).

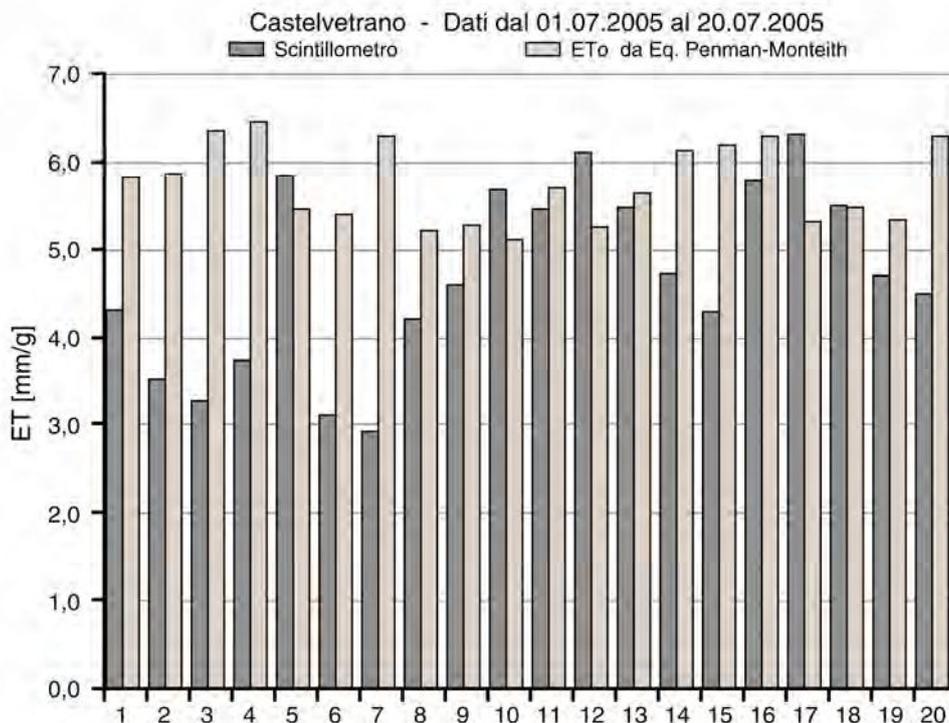
In questi i casi si è dovuto intervenire manualmente per ripristinare l'operatività del sistema, e non sempre è stato possibile farlo tempestivamente poiché lo strumento veniva controllato una o due volte a settimana.

I dati misurati hanno permesso di ricavare l'andamento orario e giornaliero dei flussi di calore latente e di effettuare un confronto sia con i dati ottenuti applicando la formula di Penman-Monteith, sia con i dati ottenuti utilizzando il modello SEBAL.

La stagione estiva, durante la quale è stata condotta la campagna di misure, è stata caratterizzata da precipitazioni scarse o nulle. Pertanto l'unico apporto di acqua al terreno è dovuto all'irrigazione.

Come si può vedere dai risultati in Figura 8.3, dove sono riportati i dati relativi al periodo più lungo, senza interruzione di continuità, di raccolta dei dati, si è avuta una prima fase durante la quale l'evapotraspirazione misurata è risultata essere quasi costantemente al di sotto di quella stimata nell'ipotesi di livello d'umidità ottimale del terreno.

**Figura 8.3 - Evapotraspirazione giornaliera misurata a Castelvetro confrontata con quella stimata applicando l'equazione di Penman-Monteith**



Questo risultato indica condizioni di stress dovute ad una insufficiente irrigazione. Nella parte centrale e finale del periodo in esame, invece, la differenza fra i valori misurati e stimati di evapotraspirazione si è mantenuta entro limiti più ristretti come conseguenza di un aumentato apporto di acqua al terreno. È interessante notare la marcata oscillazione dei valori giornalieri misurati rispetto alla variazione di quelli stimati in condizioni di irrigazione ottimale, tipica di qualsiasi processo ‘trial and error’ di ottimizzazione.

#### 8.4 Il modello SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land)

Il modello SEBAL, proposto originariamente da Bastiaanssen et al. 1994, consente la stima dell’evapotraspirazione effettiva da una superficie vegetata ricorrendo alla equazione del bilancio energetico descritta dall’equazione (1).

Il set di dati in ingresso necessari per l’applicazione del modello SEBAL è costituito da:

1. Dati meteo, quali la radiazione solare incidente, l’umidità e la temperatura dell’aria, la velocità del vento.
2. Parametri biofisici e radiometrici della vegetazione quali l’albedo di superficie, l’indice di area fogliare LAI, l’altezza della coltura.
3. Grandezze energetiche di superficie quali l’emissività e la temperatura.

Nella schematizzazione originaria, gli autori del modello SEBAL hanno proposto una serie di algoritmi per il calcolo dei termini che compaiono nella (1) applicabili utilizzando dati telerilevati nelle bande VIS/NIR e TIR. La letteratura scientifica offre pertanto numerosi esempi di applicazioni del modello SEBAL su ampie porzioni di territorio in cui si fa ricorso a svariate tipologie di sensori aerei e/o satellitari che ne consentono l’applicazione a dati spazialmente distribuiti.

Nei paragrafi seguenti vengono descritti i suddetti algoritmi per la stima dei flussi energetici che compaiono nella (1) unitamente alla metodologia suggerita per la trasformazione del flusso energetico istantaneo  $\lambda ET$  [ $W/m^2$ ] in evapotraspirazione giornaliera  $ET_{24}$  [mm/d].

##### 8.4.1 Evapotraspirazione giornaliera

Una volta ricavati, mediante gli algoritmi descritti in (Bastiaanssen, 2000 e Bastiaanssen et al., 1999) i termini  $R_n$ ,  $G_0$  ed  $H$ , l’equazione (1) consente il calcolo di  $\lambda ET$  espresso come flusso di calore latente istantaneo [ $W/m^2$ ].

Nel modello SEBAL l’integrazione di  $\lambda ET$  nelle 24 ore, e quindi la stima dell’evapotraspirazione  $ET_{24}$  espressa in  $mm d^{-1}$ , viene effettuata utilizzando il parametro  $\Lambda$  denominato “frazione evaporativa” e pari al rapporto adimensionale tra il flusso di calore latente  $\lambda ET$  ed il flusso di energia disponibile in superficie ( $R_n - G_0$ ):

$$\Lambda = \frac{\lambda ET}{R_n - G_0} \quad (2)$$

Vari studi (Bastiaanssen et al, 1994 e 1998), hanno dimostrato che nel corso delle ore diurne della giornata i valori di  $\Lambda$  [0–1] sono pressochè costanti nel tempo. Tale circostanza ha suggerito l'utilizzo di  $\Lambda$  come parametro di integrazione temporale per il calcolo dei valori di evapotraspirazione giornaliera [mm/d] tramite la seguente espressione:

$$ET_{24} \cong \Lambda \frac{R_{n,24}}{\lambda} \quad (3)$$

in cui  $\lambda$  [MJkg<sup>-1</sup>] è il calore latente di vaporizzazione ed  $R_{n,24}$  rappresenta la radiazione netta giornaliera che può essere facilmente dedotta utilizzando le note formulazione proposte nelle pubblicazioni (Allen R.G., et al. 1998).

### 8.5 Risultati e discussione della validazione del modello SEBAL a scala di campo

Al fine di rendere maggiormente significativa l'indagine, sono state utilizzate le registrazioni acquisite nei giorni in cui la coltura utilizzata per la sperimentazione (erba medica) era caratterizzata da una fase di effettivo stress idrico.

A tal fine, da un primo confronto fra le misure scintillometriche ed i valori di evapotraspirazione di riferimento ( $ET_r$ ), ottenuti utilizzando la nota formulazione di Penmann-Monteith (Allen R.G., et al.1998), sono stati prescelti i dati registrati nei giorni 14/07, 15/07 e 20/07 in cui l'evapotraspirazione effettiva misurata dallo scintillometro è risultata significativamente inferiore a quella di riferimento.

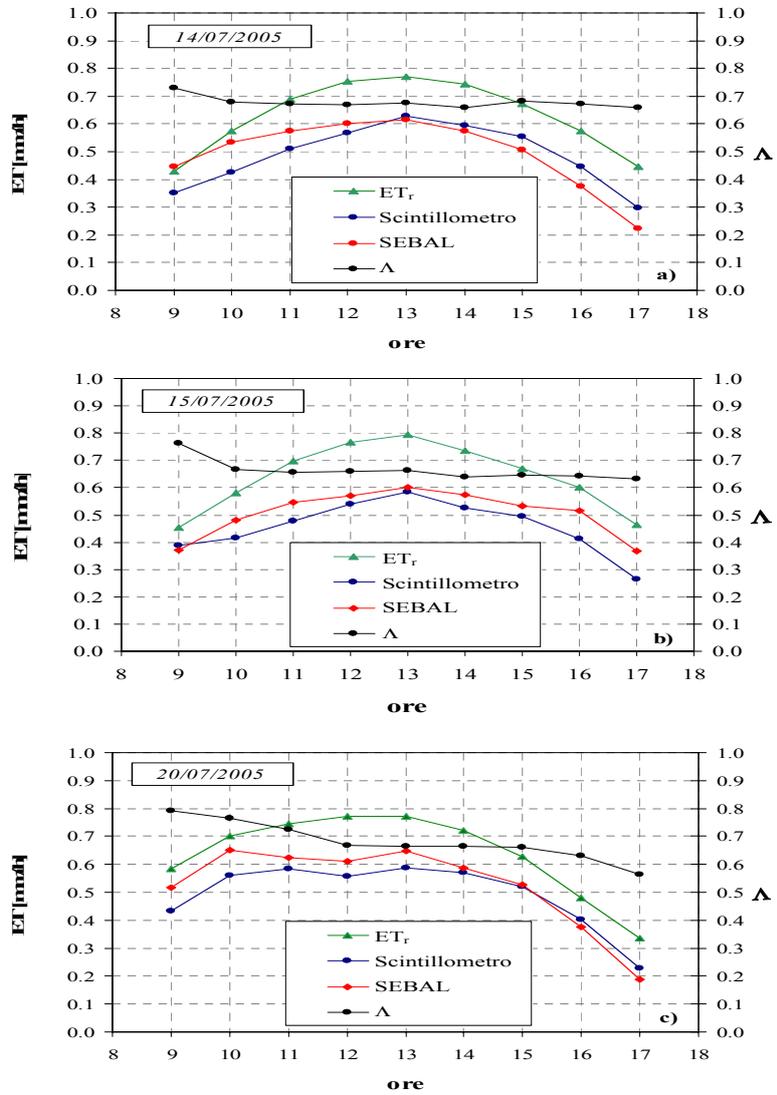
Per le suddette date l'applicazione del modello SEBAL è stata inizialmente condotta a scala oraria; successivamente è stata verificata anche la procedura per il calcolo della frazione evaporativa  $\Lambda$  e la successiva stima dell'evapotraspirazione giornaliera.

Le informazioni radiometriche di input nelle bande VIS-NIR e TIR sono state rispettivamente dedotte dalle misure spettroradiometriche e termiche acquisite in campo mediante uno spettroradiometro portatile da campo ed un termometro laser.

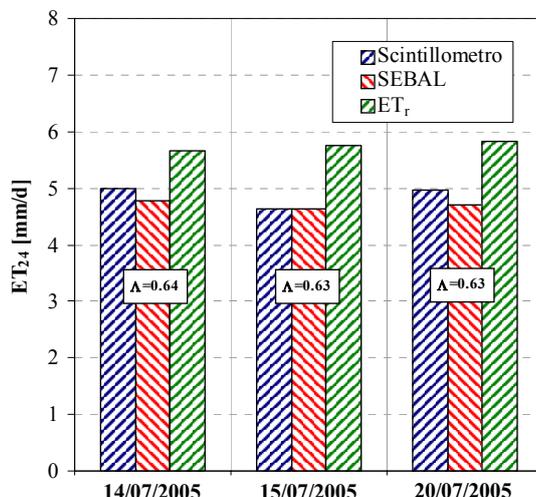
I grafici riportati nella Figura 8.4 (a, b, c) mostrano il confronto fra le stime di evapotraspirazione effettiva ottenute dal modello SEBAL e gli analoghi valori misurati dallo scintillometro durante i tre giorni di sperimentazione; gli andamenti riportati mostrano un sostanziale accordo tra le misure registrate in campo e le simulazioni ottenute dal modello SEBAL, risultate mediamente sovrastimate di un valore pari a circa il 4%. Le maggiori discrepanze si sono registrate nelle ore estreme dell'intervallo di misurazione (9.00–17.00) dove solo in un caso su 27 è stata registrata una sovrastima dei valori simulati rispetto alle misurazioni pari a circa il 31%; nelle ore centrali comprese tra le 12.00 e le 14.00 gli scarti sono risultati sempre inferiori al 10%.

Negli stessi grafici è stato riportato anche l'andamento della frazione evaporativa  $\Lambda$ , calcolata mediante l'equazione (2) ed utilizzando i valori di  $\lambda ET$ ,  $R_n$  e  $G_0$  misurati direttamente dallo scintillometro. Si è riscontrato che questo parametro, come indicato in letteratura (Bastiaanssen et al, 1998), è poco variabile durante le ore del giorno, avvalorando la possibilità di stimare il flusso evapotraspirativo giornaliero [mm/d] mediante l'equazione (3).

Figura 8.4 - Andamenti temporali delle misure di evapotraspirazione reale, risultati del modello SEBAL e della frazione evaporativa



**Figura 8.5 - Confronto fra le misure di evapotraspirazione giornaliera  $ET_{24}$  misurata e stimata dal modello SEBAL**



In particolare nel caso in esame i valori medi giornalieri di  $\lambda$  sono risultati compresi tra 0,66 e 0,69, con una variabilità oraria compresa tra un massimo di 0,79 ed un minimo di 0,63; i valori di deviazione standard del dato orario di  $\Lambda$  all'interno della giornata è risultato compreso tra un minimo di 0,021 ed un massimo di 0,038 evidenziando ulteriormente la contenuta variabilità temporale del suddetto parametro.

Quanto sopra evidenziato ha consentito di validare la procedura per la stima dell'evapotraspirazione giornaliera  $ET_{24}$  mediante l'equazione (3). A tal fine sono state utilizzate le misure termiche e radiometriche registrate alle ore 12.00.

Il grafico di Figura 8.5 sintetizza il risultato finale della validazione; in particolare è stato riscontrato un sostanziale accordo tra i valori di  $ET_{24}$  ottenuti dal modello SEBAL e gli analoghi valori dedotti dalle misure scintillometriche. Nello stesso grafico sono riportati anche i valori di  $\Lambda$  calcolati mediante l'equazione (2) ed utilizzando i valori di  $\lambda ET$ ,  $R_n$  e  $G_0$  ottenuti dal modello SEBAL; anche in questo caso le stime ottenute sono risultate in accordo con i valori misurati riportati nei grafici in Figura 8.4 (a, b, c).

## 8.6 Applicazione del modello sebal a dati telerilevati

Il modello SEBAL, nella sua configurazione originale (Bastiaanssen, 2000) è stato sviluppato per l'applicazione a dati misurati da satellite. Date le caratteristiche, il modello richiede dati da satellite multispettrali spazialmente distribuiti nel range del visibile, vicino infrarosso ed infrarosso termico; il modello richiede inoltre dati meteorologici (radiazione solare incidente, radiazione atmosferica incidente, temperatura dell'aria e velocità del vento), che possono essere misurati direttamente o ottenuti dalle stazioni meteorologiche. I dati meteorologici, quando non disponibili, possono essere sostituiti con valori stimati analizzando l'area in studio ripresa nelle immagini (ad esempio la temperatura superficiale di riferimento), salvo poche eccezioni (ad esempio la velocità del vento). Inoltre in presenza di rilievi orografici è richiesto l'utilizzo di un modello digitale del terreno (DEM) per la correzione di diversi parametri il cui valore è variabile con la quota.

Queste assunzioni permettono di limitare al minimo (o di annullare completamente) le richieste di informazioni misurate direttamente nel sito di analisi, permettendo l'applicazione del metodo in modo automatico in aree scarsamente o per nulla presidiate.

La versione del modello SEBAL, applicata a dati telerilevati, è stata implementata in ambiente ERDAS. Il modello SEBAL è stato applicato ricavando l'evapotraspirazione istantanea (al passaggio del satellite, in mm/h) e l'effettiva evapotraspirazione in 24 ore, relativa al giorno di acquisizione dell'immagine, calcolata dai flussi di calore latente istantaneo, assumendo che il valore della frazione di evaporazione istantanea sia costante nelle 24 ore (in mm). Il modello è stato applicato, come primo step, a dati SPOT VEGETATION sia per valutarne l'effettiva applicabilità, sia per le caratteristiche decadiche del dato in oggetto: infatti per ogni mese di ogni anno sono disponibili 3 immagini ottenute dalla sintesi di dieci immagini giornaliere (sintesi realizzata per i giorni 1, 11 e 21). I dati SPOT VEGETATION non contengono una banda nell'infrarosso termico: tale banda è necessaria per ottenere la temperatura superficiale terrestre al momento dell'acquisizione.

A questa mancanza si è sopperito utilizzando le temperature medie ottenute dalle misure delle stazioni a terra, con l'ipotesi che nell'arco di una giornata la temperatura non si discosti significativamente da quella media, al di fuori delle ore notturne che vengono comunque escluse dal modello SEBAL. Il modello implementato ha dimostrato la sua applicabilità ai dati satellitari, anche se, data la scarsa risoluzione spaziale (1 km x 1 km), il paragone con le misure al suolo non è stato comunque ritenuto significativo.

Il secondo step di applicazione del modello è stato realizzato su dati LANDSAT; è stata utilizzata una immagine LANDSAT relativa al giorno 30/7/2005 alle ore 9:36 (UTC) che copre la zona più est della Sicilia (la provincia di Trapani e parte di quella di Palermo). Le caratteristiche del sensore TM di LANDSAT hanno permesso di sfruttare al meglio le caratteristiche di SEBAL applicato a dati telerilevati.

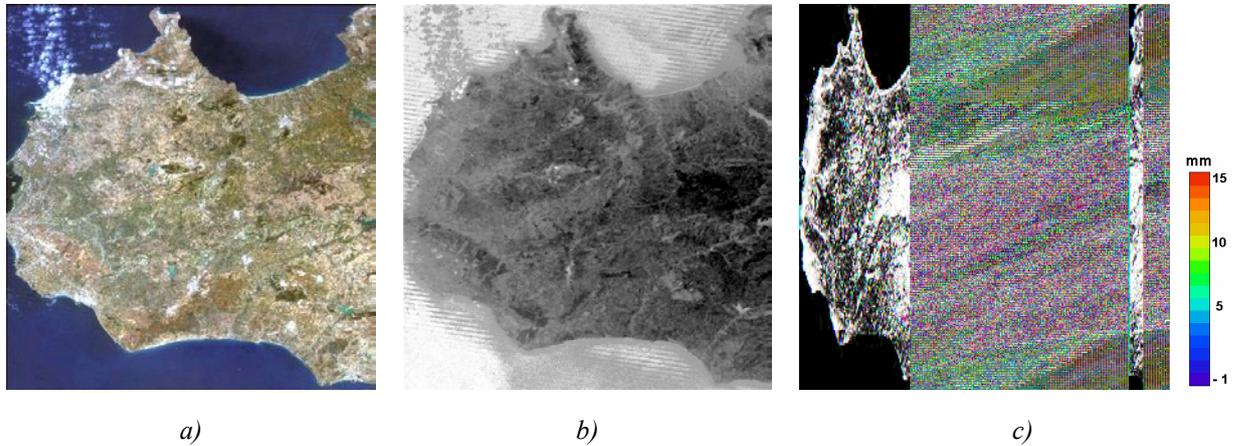
Inoltre si è provveduto a calcolare i necessari dati riguardanti la posizione solare al momento della misura, così da inizializzare i parametri del modello.

Il modello è stato applicato iterativamente per valutare gli effetti delle varie parametrizzazioni contenute nel modello stesso. Analizzando le immagini nei vari step intermedi si sono individuati i punti critici in cui i parametri standard del modello necessitano una calibrazione e si sono effettuate varie prove seguendo la logica del modello fisico implementato in SEBAL. Al termine della calibrazione si sono individuati valori per alcuni dei parametri studiati, che hanno permesso di generare un'immagine di evapotraspirazione con valori coerenti con la stagione e le caratteristiche del territorio in esame.

Dal confronto tra il valore di evapotraspirazione istantanea calcolato mediante il modello SEBAL e quello misurato con lo scintillometro a Castelvetro risulta che il modello sembra sovrastimare il valore misurato del 10% circa.

Confrontando i valori delle grandezze presenti nel bilancio energetico superficiale misurati con lo scintillometro con quelli dei prodotti intermedi del modello SEBAL, si evince che l'errore del modello nella stima del flusso di calore latente (evaporazione), è attribuibile alla rugosità superficiale e quindi alla insufficiente caratterizzazione della vegetazione all'interno del modello.

**Figura 8.6 - a) immagine Landsat 5 acquisita il 30/07/2005 ore 09:36 UTC in colori reali; b) mappa di evapotraspirazione istantanea calcolata tramite il modello SEBAL applicato all'immagine a); c) mappe di evapotraspirazione giornaliera per il giorno 30/07/2005; in bianco le aree nelle quali non è stato possibile effettuare l'inversione del dato giornaliero**



## 8.7 Conclusioni

La stima dell'evapotraspirazione costituisce un importante fattore conoscitivo del bilancio energetico ed idrologico superficiale che può avere applicazioni in campo agronomico ed idrologico. La misura puntuale dell'evapotraspirazione può essere realizzata attraverso misure micrometeorologiche ma risulta molto onerosa e pertanto il suo ricorso si giustifica solo a supporto della validazione di modelli che possano poi essere applicati utilizzando dati più facilmente misurabili.

A tale scopo l'indagine condotta ha dimostrato come l'impiego del modello SEBAL, sia basato su misure al suolo di tipo radiometrico, rilevate durante apposite campagne di misura, sia basato su misura telerilevate da satellite e/o aereo, possono rappresentare un valido strumento di valutazione del bilancio idrologico superficiale. I dati sperimentali acquisiti nell'area test di Castelvetro (TP) durante la stagione 2005, hanno permesso di effettuare una prima validazione del modello SEBAL.

Per quanto riguarda l'applicazione del modello SEBAL a zone più ampie utilizzando dati satellitari, i punti critici sono risultati, oltre alla scarsa disponibilità di dati al suolo che non hanno permesso una campagna di calibrazione e validazione efficace, la caratterizzazione della vegetazione (agricola e forestale) mediante NDVI ed il suo legame con la rugosità superficiale, e l'individuazione di zone all'interno dell'immagine da utilizzare come riferimento per casi estremi dei vari parametri (temperatura, radiazione assorbita ed emessa ecc.).

La determinazione dei parametri di input necessari per l'applicazione, su vaste aree, di modelli agro idrologici o idro geologici per la stima dei flussi di evapotraspirazione e dei bilanci superficiali su vaste aree costituisce quindi un obiettivo possibile ma che richiede ulteriori ricerche.

## 9. CONCLUSIONI

L'insieme delle attività presentate nei capitoli precedenti, costituiscono solo una parte delle conoscenze acquisite durante il progetto RIADE. Parte dei risultati delle ricerche sul territorio del bacino dell'Imera sono state condensate per dare un rilievo solo ad alcuni degli aspetti indagati. Nondimeno emerge chiaramente come la scelta di quest'area abbia consentito di evidenziare la complessità del fenomeno della salinizzazione e mettere in luce l'interazione tra le cause naturali e quelle antropiche del processo.

Un'area dalla geologia così complessa, ove il forte contributo proprio della litologia originaria alla salinità delle acque e dei suoli, determina una forte limitazione d'uso delle acque superficiali. Limitazione superata o combattuta tramite l'opera puntuale degli agricoltori che, in un lungo processo di adattamento e mitigazione, hanno continuato a coltivare un territorio, la Piana di Licata, che dati i livelli di salinità riscontrati ci aspetteremmo di vedere ridotta ad una landa desolata.

I livelli di conducibilità di determinati pozzi sono totalmente incompatibili con le coltivazioni ma gli agricoltori, con una gestione attenta della risorsa, hanno continuato ad ottenere risultati produttivi sufficienti a continuare l'attività economica.

Le tecniche utilizzate dagli agricoltori hanno però mostrato la loro debolezza negli anni di forte decremento delle precipitazioni quando non solo la quantità, ma anche la quantità dell'acqua, è risultata scarsa. L'evidenziarsi di questi limiti impone che le risposte al problema della salinizzazione siano gestite non solo dalle aziende e dai loro conduttori ma anche dalle autorità competenti con una serie di azioni che il lavoro svolto ha contribuito ad identificare.

Il patrimonio di conoscenze messo a disposizione dal progetto ha alcune peculiarità che meritano di essere approfondite.

La prima particolarità attiene a una delle idee di base di RIADE, produrre set di dati confrontabili, validati, estensibili nel tempo. Cioè mettere a disposizione, tramite uno strumento, l'RVA, i dati e le informazioni raccolte in un sistema che domani possa essere letto da chiunque e riutilizzato da tutti. Viene meno l'enfasi sulla pubblicazione cartacea dei risultati, di solito necessariamente sintetica, e si pone l'accento sul produrre set di dati omogenei, database standardizzati per i quali siano a disposizione in modo trasparente i metadati. Uno dei vantaggi di questo modo di operare è quello di rendere possibile confronti temporali tra dati prodotti in tempi diversi. Durante il corso del progetto abbiamo trovato, in più occasioni, set di dati antecedenti che sarebbe stato utile poter confrontare con i nostri, per studiare le dinamiche del fenomeno nel tempo; ogni volta l'ostacolo principale per realizzare questo confronto è stato la mancanza di informazioni essenziali per poter comparare i dati.

Studiare fenomeni complessi, come la desertificazione, significa disporre di molte informazioni spaziali e distribuite nel tempo poiché l'elemento dinamico e territoriale del fenomeno è molto più importante del semplice fotografare il suo stato. Il progetto RIADE ha cercato di porre in essere strumenti atti a superare questo vero e proprio limite delle conoscenze attuali. Lo strumento di raccolta, visualizzazione e analisi dei dati (RVA) è sicuramente un risultato del quale si sono avvantaggiati i diversi gruppi di ricerca e che contiene in se potenzialità di sviluppo ancora non del tutto esplorate.

La seconda peculiarità è una forte interdisciplinarietà nelle attività, che ha comportato non poche difficoltà iniziali, per molti di coloro che vi hanno lavorato, ma è stato momento di arricchimento sia personale, ma soprattutto scientifico. Sul solo tema di questo volume, la salinizzazione, hanno lavorato geologi, agronomi, chimici, fisici, informatici, matematici, ingegneri. Crediamo non sia usuale trovare compagini scientifiche altrettanto articolate.

Con queste premesse risulta chiaro che i risultati costituiscono un avanzamento dello stato delle conoscenze, su un determinato territorio, non fine a se stesso ma costruito per poter essere utilizzato ai fini di definire le azioni per contrastare il fenomeno. Superando la schematicità della relazione tra forte emungimento degli acquiferi e intrusione marina si sono evidenziati tutti i cofattori che contribuiscono alla salinizzazione, quelli di ordine gestionale e pianificatorio (la dinamica urbanistica, lo sviluppo del porto, le opere idrauliche sul bacino), quelli costitutivi (litologia, falde, clima), quelli storici (eventi alluvionali, sviluppo e decadenza delle miniere) e quelli prettamente agricoli (scavo dei pozzi, irrigazione, coltivazioni intensive, rotazioni). Non tutto ha trovato spazio in questo rapporto, ma è stato oggetto di indagine e monitoraggio, e può essere considerato un patrimonio di conoscenze utile a pianificare interventi sul territorio superando logiche settoriali e/o monodisciplinari.

Il progetto RIADE grazie alle attività realizzate, con l'indispensabile supporto degli apparati tecnici ed amministrativi locali, può essere l'inizio di scelte di natura politica, tecnica e gestionale per mitigare la salinizzazione.

L'azione coordinata, incisiva e attenta degli enti preposti al presidio del territorio limiterebbe tutte quelle azioni autonome degli imprenditori agricoli, che, se da una parte risolvono il problema contingente della singola azienda, dall'altra non fanno che favorire l'espandersi del fenomeno, rischiando di lasciare alle generazioni future, suoli salinizzati e degradati con forti limitazioni d'uso.

## 10. Bibliografia

Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., and Smith M., 1998: "Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements". *FAO Irrigation and Drainage Paper* n. 56, Rome, Italy.

Annali idrologici, 1996: Regione Siciliana, Servizio Tecnico Idrografico Regionale.

Amore C., Geremia F., Randazzo, 1999: *Historical Evolution and Sediment Character of the Salso River Delta, Italy*. Presentato a VII Coastline, Miedzyzdroje (NW-Poland), 7-12 June 1999.

Aristipini P., Del Bugaro D., Fiorani L., Loreti S., Palucci A., Patsayeva S., 2004: *Il laboratorio mobile ENVILAB dell'ENEA durante la campagna in Sicilia per il progetto RIADÉ*. Rapporto Tecnico ENEA RT/2004/18/FIS.

Aristipini P., Fiorani L., Menicucci I., Palucci A., 2005: *Spettrofluorimetro laser portatile per l'analisi in situ dei liquidi non opachi*. Brevetto RM2005A000269 (30 Maggio 2005).

Aristipini P., Del Bugaro D., Fiorani L., Menicucci I., Palucci A., De Nicolais A., 2006: *Indagine della qualità delle acque con il CASPER (Compact and Advanced Laser Spectrometer for Riade) dell'ENEA durante la seconda campagna in Sicilia per il progetto RIADÉ*. Rapporto Tecnico ENEA RT/2005/58/FIS.

Bandinelli G. et al., 2000: *Metodologia per la redazione di una carta in scala 1:250000 sulle aree vulnerabili al rischio di desertificazione in Sardegna, sulla base di parametri meteorologici, fisiografici e pedologici* – Sassari, 2000.

Bastiaanssen, W.G.M., H. Pelgrum, J. Wang, Y. Ma, J. Moreno, G.J. Roerink and T. van der Wal, 1998: "The Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL): Part 2 validation". *J. Of Hydr.* 212-213: 213-229.

Bastiaanssen, W.G.M., M. Menenti, R.A. Feddes and A.A.M. Holtslag, 1998: "The Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL): Part 1 formulation". *J. of Hydr.* 212-213: 198-212.

Bastiaanssen, W.G.M. and M.G. Bos, 1999: "Irrigation performance indicators based on remotely sensed data: a review of literature". *Irrigation and Drainage Systems* 13: 291-311.

Bastiaanssen, W.G.M. 2000: SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *J. Hydrology* 229:87-100.

Carnemolla S., Drago A., Perciabosco M. e Spinnato F., 2002: “Metodologia per la redazione di una carta in scala 1:250000 sulle aree vulnerabili al rischio di desertificazione in Sicilia”, <http://217.58.222.70/>

Decima A. e Wezel F., 1971: “Osservazioni sulle evaporiti messiniane della Sicilia centro-meridionale”. *Rivista Mineraria Siciliana*, 130-132, pp. 217-232.

Decima, A. e Wezel, F., 1973: “Late Miocene evaporites of the Central Sicilian Basin”. *Init. Rep. DSDPLeg 13*, 1234–1240.

EEA, 2003: *Europe's water: an indicator based assessment*. Topic report 1. 2003.

Fierotti G., Dazzi C., Tusa D., 1999: *Riflessi dell'irrigazione con acque saline sulla qualità dei suoli*. Convegno Progetto POM OTRIS, Foggia. <http://www.inea.it/otris/>

Grasso M., Licorish W.H., Diliberto S.E., Geremia F., Maniscalco R., Maugeri S., Pappalardo G., Rapisarda F. e Scamarda G., 1998: “*Geological Map of the Licata Fold Belt (South Central Sicily)*”: Explanatory Notes. *Annales Tectonicae*, Firenze, Vol. XII, 1-2, pp. 51-58.

Hydrolab Corporation, 1999: “Minisonde 4a”. *User's Manual, Revision G*.

Ogniben L., 1957: “Petrografia della Serie Solfifera siciliana e considerazioni geologiche relative”. *Mem. Descr. Carta Geologica Italia*, **33**, 275 p.

Regione Siciliana - Assessorato Agricoltura e Foreste - Gruppo IV Servizi e Sviluppo - Unità di Agrometeorologia, 1998: *Climatologia della Sicilia (vol. 2)*. Palermo.

Regione Siciliana - Assessorato Agricoltura e Foreste - Gruppo IV Servizi e Sviluppo - Unità di Agrometeorologia, 2000: *Atlante climatologico della Sicilia*, Palermo.

Roda, C., 1971: “Origine della salinità delle acque del F. Salso o Imera meridionale”, *Boll. Acc. Gioenia Sc. Nat.*, **10**, 471-530.

SIAS: Servizio Informativo Agrometeorologico Siciliano, <http://217.58.222.70/>

Stancanelli, 1979: *Studio di simulazione di corrente a pelo libero in alveo naturale*. Tesi di laurea. Istituto d'Irradiazione e di Gestione delle Acque dell'Università di Catania.

## **Contributi**

*Il presente rapporto è stato realizzato da un **gruppo di autori** composto da:*

Carmela Vaccaro, Dimitra Rapti Caputo, Nicola Colonna, Paolo Capocecera, Flavio Lupia, Antonio Palucci, Luca Fiorani, Antonio Poletti, Sandro Murgia, Roberta Selvaggi, Massimo Iannetta, Maurizio Sciortino.

*Ogni autore era inserito in un gruppo di ricerca autonomo composto da diversi collaboratori che hanno dato contributi settoriali importanti:*

ENEA Casaccia: Paolo Capocecera, Nicola Colonna, Francesco Pasanisi, Andrea Pagano, Flavio Lupia, Sandro Martini, per le campagne di monitoraggio l'installazione e gestione della sonda, la cartografia

ENEA Frascati: Antonio Palucci, Stefano Loreti, Luca Fiorani, Paolo Aristipini, Menicucci Ivano, per la messa a punto di CASPER e il monitoraggio con le tecniche Lidar.

ENEA Bologna: Paolo Bartolomei, Morena Neri

Università di Ferrara: Carmela Vaccaro, Dimitra Rapti Caputo, per il coordinamento scientifico della parte idrogeologica e idrogeochimica, analisi climatologiche, le campagne di monitoraggio. Linda Bertelli, Dimitra Rapti Caputo e Renza Tassinari per le analisi delle acque, Dimitra Rapti Caputo e Mattia Taroni per la spazializzazione dei dati

Università di Perugia: Dipartimento di chimica Antonio Poletti, Sandro Murgia, Roberta Selvaggi, per le analisi chimico fisiche delle acque fluviali e gestione e analisi dei dati della sonda

CSEI Catania: Salvatore Indelicato e Patrizia Moschetto per il coordinamento di tutte le attività nella regione e l'organizzazione di alcuni layer informativi, il coordinamento dei report

ACS: Letizia Compagnone, Luigi Perelli, Massimo Cuomo, per la standardizzazione dei dati, la loro visualizzazione complessa (RVA) e la spazializzazione

## **Ringraziamenti**

*Alle attività di ricerca hanno anche collaborato le seguenti persone alle quali va il nostro apprezzamento: Romano Bruschi, Monica Misceo, Sergio Grauso, Dino del Bulgaro.*

*Un ringraziamento particolare per il supporto logistico e l'aiuto a:*

- Comune di Licata, Dipartimento di Urbanistica e Gestione del Territorio, nella persona dell'ing. Vincenzo Ortega, e dei collaboratori Gaetano Ribellino e Salvatore Pavone
- SOAT di Licata nella persona del dott. Ingazio Vassallo e del dott. Enzo Carlino e di tutti gli altri collaboratori
- dott. agr. Gianni Bellini, per lo studio degli aspetti agronomici del territorio di Licata
- la società SO.GE.AS dell'acquedotto di Siracusa, ing. La Torre e ing. Inanziti
- Antonello Mamo della Soprintendenza dei Beni Culturali di Siracusa
- Claudio Miraglia, libero Professionista.

*Si ringraziano per la preziosa collaborazione fornita per la realizzazione delle attività sperimentali presso il centro RSMA di Vigna di Valle, i dott. G. Casu, Dott. G. Foti, dott. F. Malaspina e dott. E. Vuerich dell'Aeronautica Militare.*

*Si ringrazia per la collaborazione ed il coordinamento logistico in Sicilia il dott. Antonino Drago dell'Assessorato Agricoltura e Foreste della Regione Siciliana, SIAS.*





Edito dall'ENEA  
Unità Comunicazione  
Lungotevere Thaon di Revel, 76 - 00196 Roma  
*www.enea.it*

Edizione del volume a cura di Giuliano Ghisu  
Copertina: Bruno Giovannetti  
Stampa: Page Service (Roma)  
Finito di stampare nel settembre 2008